

## THESIS / THÈSE

### MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

#### Mesurer les particules fines de l'atmosphère au sein d'une application de crowdsensing "PrismOnBike"

Turnauer, Laurent

*Award date:*  
2015

*Awarding institution:*  
Université de Namur

[Link to publication](#)

#### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

#### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITÉ DE NAMUR  
Faculté d'informatique  
Année académique 2014–2015

**Mesurer les particules fines de  
l'atmosphère au sein d'une  
application de crowdsensing  
« PrismOnBike »**

Laurent Turnauer



Promoteur : Laurent Schumacher

(Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de  
Master en Sciences Informatiques.

---

## Résumé

---

Depuis le siècle dernier, les développements économiques rapides des pays industrialisés ont dégradé sensiblement la qualité de l'air de notre atmosphère terrestre. La pollution atmosphérique est devenue une problématique mondiale importante et montre à chacun sa part de responsabilité. En effet, nous partageons tous l'air que nous respirons. Les phénomènes naturels permettant la restauration de l'atmosphère ont perdu leurs équilibres fragiles ce qui a eu pour effet de créer des accumulations de composés chimiques dangereux pour la santé humaine et pour l'environnement écologique. Le nombre de particules de plus en plus fines sont un des problèmes les plus nocifs pour notre qualité de vie. Celles-ci causant des problèmes de santé grave. Dans ce mémoire, nous allons nous rendre compte que les autorités mondiales prennent sérieusement ce problème de pollution particulaire en développant des réseaux de mesures disséminés sur un bon nombre de territoire. Ces autorités imposent de plus en plus de restrictions dans l'émission de polluants selon des directives de régulation. Parallèlement à ces activités officielles, les citoyens du monde entier commencent à prendre conscience de la gravité de la situation atmosphérique et des problèmes futurs liés à la qualité de l'air. Ainsi des groupes se forment autour de l'élaboration de systèmes de mesures de la pollution. Aujourd'hui, l'accès et l'apprentissage des techniques liées à l'utilisation de l'électronique permettant l'évaluation de la qualité de l'air sont grandement facilités par différentes plateformes de développement et par le développement de capteurs "low-cost" particuliers. Ces projets viennent ajouter une nouvelle perspective dans l'analyse de la qualité de l'air. Ce mémoire nous permettra de comprendre les différentes techniques de mesures utilisées dans les réseaux télémétriques officiels de la pollution atmosphérique. Nous allons ensuite collaborer à cette tendance citoyenne en élaborant un système de crowdsensing permettant la mesure de la quantité de matières particulaires en suspension dans l'atmosphère. Nous chercherons les types de capteurs adéquats et nous fabriquerons un prototype concret qui nous permettra ce type de mesure. Nous validerons l'adéquation des données mesurées de notre système avec les données recueillies par le réseau officiel belge "CELINE". Cette étude nous montrera la faisabilité d'effectuer ce genre de mesure avec du matériel que chacun peut, aujourd'hui, se procurer aisément.

---

## **Avant-propos**

---

La pollution atmosphérique est une problématique complexe et extrêmement vaste. Les quelques pages d'un mémoire de fin d'étude ne suffisent pas pour décrire et comprendre complètement l'étendue du problème et les implications humaines et enjeux économiques. Il s'agit de phénomènes très dynamiques qui se déroulent dans l'espace et le temps. Un pollueur ne pollue pas que pour son espace mais bien pour la globalité de l'atmosphère terrestre. Une émission étant ressentie à divers endroits, elle participe aux développements d'autres composés chimiques polluants. L'action de mesurer les taux de polluants de l'atmosphère est un processus en perpétuel développement. Depuis la moitié du siècle dernier, les autorités ont pris conscience de ce phénomène de pollution à une échelle globale. Les taux et seuils d'alertes pour la santé humaine n'ont cessé d'être de plus en plus restreints suite aux découvertes des impacts liés à la santé humaine et à l'environnement. Les technologies utilisées sont devenues de plus en plus pointues dans l'estimation des variations de gaz et particules en suspension au sein de l'atmosphère. L'objectif de ce mémoire est une approche de développement d'un outil de collecte d'informations sur la problématique de la pollution particulaire. Un prototype concret apportera une preuve de concept concernant la faisabilité de la mesure du taux de particules en suspension de façon mobile à l'aide d'un smartphone android et d'un capteur particulier dans l'utilisation d'une application de type crowdsensing.

***Remerciements :***

*Je remercie mon promoteur, Laurent Schumacher, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses relectures et corrections et pour m'avoir laissé une grande liberté dans la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie ma mère et ma compagne Marie pour leurs aides, lectures et corrections ainsi que pour leur infinie patience durant ces quatre longues années.*

*Je remercie également mes acolytes Dorian et Olivier pour leur aide et soutien moral tout au long de cette épopée.*

*à mon père,*

---

## Table des matières

---

<b>Résumé</b>	<b>1</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>2</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>10</b>
<b>2 Etat de l'art</b>	<b>13</b>
2.1 Le système du crowdsourcing . . . . .	13
2.2 Représentativité statistique des données . . . . .	15
2.3 Approximation du nombre de participants . . . . .	16
2.4 Du crowdsourcing vers le crowdsensing . . . . .	18
2.5 Plusieurs projets de mesures de pollution . . . . .	19
<b>3 La pollution atmosphérique</b>	<b>22</b>
3.1 Introduction . . . . .	22
3.2 Pollution primaire et secondaire . . . . .	24
3.3 Sources extérieures . . . . .	24
3.3.1 Particules PM . . . . .	25
3.3.2 Ozone troposphérique $O_3$ . . . . .	26
3.3.3 Les oxydes d'azote $NO_x$ . . . . .	28
3.3.4 Les oxydes de carbone $CO_x$ . . . . .	28
3.3.5 Le dioxyde de soufre $SO_2$ . . . . .	29
3.3.6 Composés organiques volatils COV - HAP . . . . .	29
3.4 Sources intérieures . . . . .	30
3.4.1 Les polluants biologiques . . . . .	31
3.4.2 Les polluants chimiques . . . . .	31
3.4.3 Les polluants de combustion . . . . .	33
3.4.4 Les polluants physiques . . . . .	33
<b>4 Normalisation des émissions de pollution</b>	<b>34</b>

<b>5</b>	<b>Méthodes et mesures normalisées</b>	<b>38</b>
5.1	Réseaux de stations fixes . . . . .	39
5.1.1	Mesure temps réel . . . . .	44
5.1.2	Mesure différée . . . . .	45
5.1.3	Indice de qualité - BelAtmo . . . . .	45
5.2	Techniques d'analyses des polluants . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Capteurs de pollution "low-cost"</b>	<b>49</b>
6.1	Introduction et motivation . . . . .	49
6.2	Typologie des capteurs de gaz et de particules . . . . .	50
6.2.1	Caractéristiques fondamentales du capteur de gaz . . . . .	50
6.2.2	Caractéristiques fondamentales du capteur électrochimique . . . . .	52
6.2.3	Caractéristiques fondamentales du capteur à variation de masse . . . . .	56
6.2.4	Caractéristiques fondamentales du capteur à variation optique . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Prototypage expérimental</b>	<b>62</b>
7.1	Introduction . . . . .	62
7.2	Carte interface android - IOIO OTG . . . . .	63
7.3	Les capteurs particuliers "low-cost" . . . . .	64
7.3.1	Sharp GP2Y1010AU0F . . . . .	66
7.3.2	Shinyei PPD42NS . . . . .	69
7.3.3	DFRobot SEN0177 . . . . .	71
7.4	Elaboration du prototype . . . . .	72
7.4.1	Diagramme des composants . . . . .	72
7.4.2	Modifications de l'application "PrismOnBike" . . . . .	73
7.4.3	Constatations techniques . . . . .	75
7.4.4	Implémentation du micro-contrôleur Arduino . . . . .	76
7.4.5	Schéma du prototype Arduino . . . . .	79
7.4.6	Fichier de données géographiques - Geo.Json . . . . .	79
7.4.7	Implémentation de la classe "MapViewActivity" . . . . .	80
7.4.8	Serveur central - PrismOnline Viewer . . . . .	85
<b>8</b>	<b>Preuve de concept - Tests et évaluations</b>	<b>88</b>
8.1	Introduction . . . . .	88
8.2	Collection de données comparatives . . . . .	88
8.3	Comparatifs des capteurs de particules . . . . .	90
8.4	Scénario d'utilisation "Mesurer la pollution PM" . . . . .	92
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>94</b>



<b>10 Annexe</b>	<b>96</b>
10.1 Implémentation Arduino R3 . . . . .	96
10.2 Implémentation "MapViewActivity" . . . . .	98
10.3 Implémentation du serveur central . . . . .	104
<b>Références bibliographiques</b>	<b>116</b>
<b>Table des figures</b>	<b>122</b>

---

## Glossaire

---

- $\text{CH}_4$  Le méthane constituant principal du gaz naturel. 23
- $\text{CO}_2$  Dioxyde de carbone. 24, 44, 57
- $\text{CO}_x$  Les oxydes carboniques  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ . 5, 28, 29
- $\text{CO}$  Monoxyde de carbone. 19, 21, 23, 24, 38, 40, 44
- $\text{HNO}_3$  Acide nitrique. 24
- $\text{H}_2\text{O}_2$  Le peroxyde d'hydrogène aussi appelé eau oxygénée. 24
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  Acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . 24
- $\text{NO}_2$  Dioxyde d'azote. 21, 24, 26, 28, 38, 44, 46, 49
- $\text{NO}_3$  Nitrate. 24
- $\text{NO}_x$  Les oxydes d'azote  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  nitrate. 5, 25, 27, 28, 38, 40, 49, 108, 122
- $\text{NO}$  Monoxyde d'azote. 24, 26, 28, 38, 44
- $\text{N}_2\text{O}$  Protoxyde d'azote, le gaz hilarant. 23
- $\text{O}_2$  L'oxygène. 28
- $\text{O}_3$  L'ozone. 5, 19, 23, 24, 26, 27, 38, 40, 44, 49
- $\text{SO}_2$  Dioxyde de soufre. 5, 24, 25, 27, 29, 38, 40, 44–46, 49, 108, 122
- $\text{SO}_3$  Trioxyde de soufre. 24
- $\text{SO}_4$  Le sulfate qui est le sel de l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . 24
- BRICS** Regroupement des pays émergents - Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud. 24
- CEE-ONU** Commission économique des Nations Unies pour l'Europe. 27
- CN** Carbone noir - Les noirs de carbone sont des poudres formées de carbone élémentaire sous forme de particules primaires, presque sphériques agrégées puis regroupées en agglomérats. Une partie peut pénétrer jusqu'à l'alvéole pulmonaire, une fraction des particules peut être qualifiée d'ultra-fines. ( $< \text{PM}_{2.5}$ ). 25, 27, 40, 108, 122

- COV** Composés Organiques Volatils. 5, 19, 24, 25, 27, 29, 30, 36, 38, 41, 43–45, 53
- EEA** European Environment Agency - Agence Européenne pour l'environnement. 26, 35, 36, 39
- HAP** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. 5, 29, 30, 45
- HITEA** Health Effects of Indoor Pollutants : Integrating microbial, toxicological and epidemiological approaches. 31
- NEC** National Emission Ceilings Directive - Directive sur les émissions limites nationales. 35
- NPA** Nitrates de peroxyacétyl. 24
- OMS** Organisation Mondiale de la Santé ou WHO - World Health Organization. 23, 25, 31
- PM** Matière particulaire. 5, 24, 25, 27
- polluant primaire** Substance chimique produite directement au niveau de la source émettrice. 24
- polluant secondaire** Substance chimique formée grâce à l'association de plusieurs polluants primaires. 24
- ppb** Partie par milliard : rapport de concentrations volumiques de l'ordre de  $10^{-9}$ . 22, 23
- ppm** Partie par million : rapport de concentrations volumiques de l'ordre de  $10^{-6}$ . 22, 23
- ppt** Partie par billion : rapport de concentrations volumiques de l'ordre de  $10^{-12}$ . 22, 23
- PRISM** Platform for Remote Sensing using Smartphones. 12

---

## Introduction

---

L'industrialisation n'a cessé de croître ces dernières décennies favorisant un développement économique et social dans les pays les plus riches. Parallèlement à ces avancées techniques, l'activité humaine a fortement favorisé l'augmentation de la pollution atmosphérique.

L'état de la santé humaine est notamment déterminé par la qualité de son environnement physique, chimique et microbiologique et par la qualité de l'air que nous respirons. L'air est un vecteur important de divers polluants portant une atteinte à la santé. La mise en place de système de gestion de la qualité de l'air est devenue de plus en plus nécessaire. En raison des phénomènes météorologiques, la mesure exacte de pollution est difficile à effectuer. Elle est devenue un problème majeur impliquant des conséquences néfastes sur les ressources biologiques, les écosystèmes, le climat et des impacts importants sur la santé, l'eau, l'air ou la terre ou encore d'autres biens matériels. Il incombe à tous les pays du monde de prendre conscience de ces problématiques et particulièrement de pouvoir mesurer avec la plus haute résolution spatiale possible l'exposition des citoyens aux polluants, et particulièrement les citoyens.

L'effet de serre a naturellement permis de maintenir une température viable et adéquate permettant ainsi le développement de la vie sur terre. Cependant les rejets massifs de pollution inhérents à l'activité humaine et industrielle ont favorisé un réchauffement climatique ainsi que le percement partiel de la couche d'ozone. Ces principaux problèmes relèvent ainsi de la responsabilité de chacun. Depuis la conscientisation de la problématique et l'impact de la pollution au niveau des autorités internationales, des coopérations ont été lancées pour chercher à réduire les quantités de polluants rejetées.

Depuis quelques années, le modèle du crowdsourcing semble s'être largement immiscé dans un très grand nombre de secteurs : commercial, marketing, scientifique... Voir la figure 10.1 en annexe. Il s'agit d'un modèle dit *bottom-up* de bas en haut pour la collecte de données qui permet l'élaboration d'un modèle plus abstrait se basant sur des valeurs concrètes et réalistes. Ces données récoltées proviennent de personnes participant à l'activité dite de crowdsourcing. L'apparition de smartphones de plus en plus perfectionnés et dotés de capteurs particuliers ont permis l'approvisionnement de ces données grâce à une très large fraction de la population ayant accès à ce type d'appareil. Le modèle de crowdsourcing apparu avec le web 2.0, s'est affiné en promouvant le crowdsensing qui n'est

autre que l'usage de smartphones pour capter une donnée selon le modèle du bottom-up.

Les taux de pollution ont jusqu'à présent été mesurés à l'aide de stations télémétriques statiques hautement perfectionnées et disséminées à divers endroits stratégiques d'un territoire sous l'égide d'une autorité de gestion et de réglementation. Ces divers nœuds de captations forment un système de mesure en forme de maille. Des modèles d'extrapolation de diffusion de pollution sont utilisés pour déterminer les quantités de gaz et particules entre les différentes stations de mesures.

Dans un contexte de type crowdsourcing [82], l'utilisation de capteurs particuliers associés aux smartphones des citoyens, permettrait de compléter ces mesures statiques et pourrait rendre la représentation de la diffusion des polluants plus dynamique. Les technologies de ces petits capteurs embarqués ne favoriseraient cependant pas une mesure exacte mais plutôt une détection de gaz polluants ce qui ferait alors apparaître des zones potentiellement plus polluées que d'autres. Dans le cas où un besoin de précision scientifique est requis, des stations de plus grande précision pourront être utilisées à ces endroits.

Ces capteurs de polluants associés à un besoin de mobilité sont par nature grand public et ne représentent pas un coût financier important. Ils peuvent dès lors être connectés via des périphériques associés aux smartphones grâce à l'émergence des micro-contrôleurs électroniques peu onéreux.

L'inconvénient majeur de ces types de capteurs "low-cost" est qu'ils ne permettent pas une mesure précise dans le temps car leurs fonctionnements internes induisent des problèmes liés à la sensibilité, la sélection, à la dérive et à la stabilité de la mesure. Pour obtenir une valeur mesurée la plus juste possible et le plus longtemps possible, ces capteurs doivent régulièrement faire l'objet de révisions et calibrations. De plus, les niveaux de température, de taux d'humidité ou de pression barométrique introduisent aussi un besoin de compensations des valeurs mesurées pour permettre une utilisation efficace.

Nous allons premièrement rappeler les principes du crowdsourcing et aborder la problématique de la mesure de pollution au travers de différents projets de crowdsensing. L'étude des gaz et particules constituant l'atmosphère ainsi que leurs normalisations d'émissions suivront avant d'étudier plus en profondeur les différents types de capteurs possibles et leurs technologies de fonctionnement.

L'objectif de ce mémoire sera de fournir une solution concrète capable de mesurer l'augmentation de particules en suspension dans l'atmosphère. Cette mesure de polluant se fera avec l'ajout d'un capteur de particules fines au sein de l'application native "PrismOnBike" développée lors du mémoire de fin d'étude de Monsieur Mohamed Karmani

(Promotion 2014). Cette application mobile de type PRISM [91] permet actuellement essentiellement la mesure du niveau de réception RSSI et la mesure du déplacement sur l'axe vertical du téléphone mobile de type android. Cette analyse d'accéléromètre permet de détecter les nids de poules le long de parcours cyclistes. Cette application sera donc modifiée pour permettre l'ajout d'un capteur de particules fines. La liaison entre le téléphone et le capteur de particules se fera à l'aide d'une carte électronique d'interface IOIO-OTG. La mise à disposition publique des données collectées s'effectuera grâce à une plateforme de collecte sous la forme d'une représentation cartographique et de points de relevés des niveaux de pollution particulaire.

Après l'implémentation et le prototypage de ce système de mesure de particules, nous effectuerons, pour finir, quelques tests en extérieur pour valider le concept de captation en mettant en relation les mesures effectuées par l'application et celles publiées par les autorités nationales.

### 2.1 Le système du crowdsourcing

Le crowdsourcing<sup>1</sup> signifie un approvisionnement par la foule. Ce néologisme créé en 2006 par Jeff Howe, rédacteur au magazine "Wired", est apparu dans un article nommé "The Rise of crowdsourcing" [78]. Cet article est lui-même basé sur le livre "The Wisdom of crowds"[90] publié en 2004 de James Surowiecki, journaliste au "New Yorker". Il nous explique l'intelligence collective et le phénomène statistique du crowdsourcing ainsi que la montée en puissance du phénomène. Il provient de l'activité dite de "outsourcing" qui exprime une externalisation, une sous-traitance des tâches d'une entreprise et de "crowd", signifiant foule en anglais.

La figure 2.1 présente le schéma de fonctionnement du crowdsourcing. (A) Un commanditaire fait appel aux ressources des participants (B), ceux-ci effectuent le travail demandé et permettent la collecte de données réclamées (C) en échange d'une certaine récompense (D).

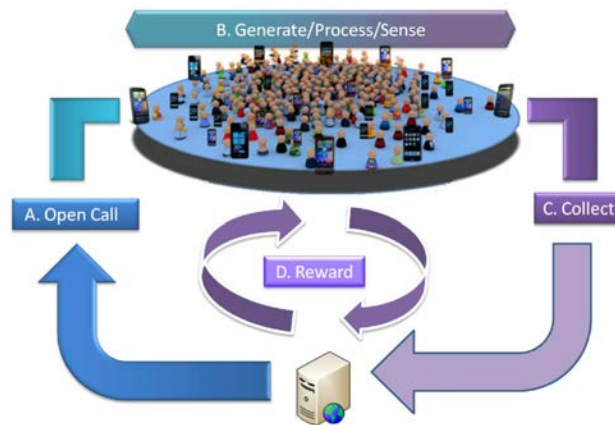


FIGURE 2.1 – Concept du crowdsourcing [60].

De façon brève et concise, il s'agit ni plus ni moins d'interroger un grand nombre de personnes sur une problématique précise. Que ces personnes soient ou non expertes par

1. Informations textuelles reprises du projet personnel [62].

rapport au domaine du questionnement importe peu, car statistiquement les résultats obtenus feront naturellement apparaître une courbe en cloche, la "courbe de Gauss". Cette courbe suit une distribution de la loi normale, la loi du hasard. L'idée fondamentale est que l'on peut ainsi se rapprocher de la valeur attendue "cible" de façon quasi exacte en menant plusieurs fois la même expérience, la même question. Il y a statistiquement plus de chances, si les personnes sont nombreuses, que les réponses obtenues soient relativement proches de la bonne réponse. Et à l'inverse, il y a moins de chances pour que les réponses soient toutes fausses. James Surowiecki en arrive à la conclusion que la foule est remarquablement précise et, collectivement, plus juste et intelligente que le meilleur des spécialistes.

Selon Surowiecki, le crowdsourcing [90] a donc pour vocation d'utiliser les ressources, les connaissances, la créativité, l'intelligence et le savoir-faire d'un grand nombre d'individus volontaires pour fournir un certain travail. On parle souvent de "human computation"<sup>2</sup> en évoquant le crowdsourcing. Voir la figure 2.1. Les recherches de Daren Brabham [71], professeur assistant de journalisme et de communication de masse à l'Université de Caroline du Nord à Chapen Hill, indiquent une même définition. Le crowdsourcing est une interaction entre, d'un côté, une entreprise qui demande une certaine activité en gardant un certain contrôle et, de l'autre côté, des utilisateurs qui effectuent le travail demandé de façon volontaire parce qu'ils y trouvent de l'intérêt. Pour Brabham, le crowdsourcing[71] est une tâche précise et définie qu'une organisation supérieure a besoin d'effectuer. Cette tâche sera accomplie par une communauté de gens externes et volontaires dans un environnement "en ligne", ce qui permettra diverses interactions entre les acteurs de ce travail collaboratif et le commanditaire de départ. Dans son ouvrage, le professeur Brabham nous propose la société "Threadless" comme exemple d'application évocateur de ce nouveau type de modèle de travail.

Voici d'autres exemples de collaborations utilisant le procédé du crowdsourcing qui se sont immiscées dans nos vies modernes. Prenons l'exemple de "Amazon Mechanical Turk" [64] qui est une plateforme de demande de travailleurs "on line". Une entreprise demande une tâche particulière à un grand nombre de personnes volontaires qui seront rémunérées. Ce travail peut prendre la forme d'un sondage, de traductions de textes, d'obtentions d'informations quelconques, de recherches en tous genres. Soit n'importe quel type de travail où les acteurs humains sont plus performants que les ordinateurs, évoquant la notion de "human computation". Un autre exemple est "InnoCentive" [45] qui est une plateforme grâce à laquelle une entreprise fait appel à l'intelligence collective pour effectuer des recherches scientifiques ou relever des défis technologiques. Le moteur de recherche "Google" utilise également les différentes requêtes de ses utilisateurs pour présenter dans un ordre arbitraire les résultats des recherches. "Google Earth" ou "OpenStreetMap" en sont d'autres exemples, où les utilisateurs confirment ou entrent des

---

2. Le fait de comparer l'intelligence collective comme étant une puissance de calcul gigantesque.



données précises sur telle ou telle zone géographique. Il y a également un aspect d'annotation ou de "tagging" sur les photos ou vidéos de lieux communs pas entièrement référencés. De nombreuses applications utilisant la "science" de la population existent, citons par exemple "Waze.com", "VTrack", "SignalGuru", "SmartTrace", "Safecast" et bien d'autres... Ces quelques exemples ne sont pas exhaustifs. Le site "resultsfromcrowds.com" [53] présente une liste plus large encore d'autres projets et secteurs utilisant le mécanisme du crowdsourcing. Dans tous ces exemples, le grand nombre de personnes fournit une gigantesque puissance de travail collective et agrégée. La charge de travail morcelée en micro-tâches plus simples [66] est réalisée par des personnes individuelles. Par la suite, les produits de toutes ces micro-tâches sont consolidées pour former le résultat de la tâche originale.

## 2.2 Représentativité statistique des données

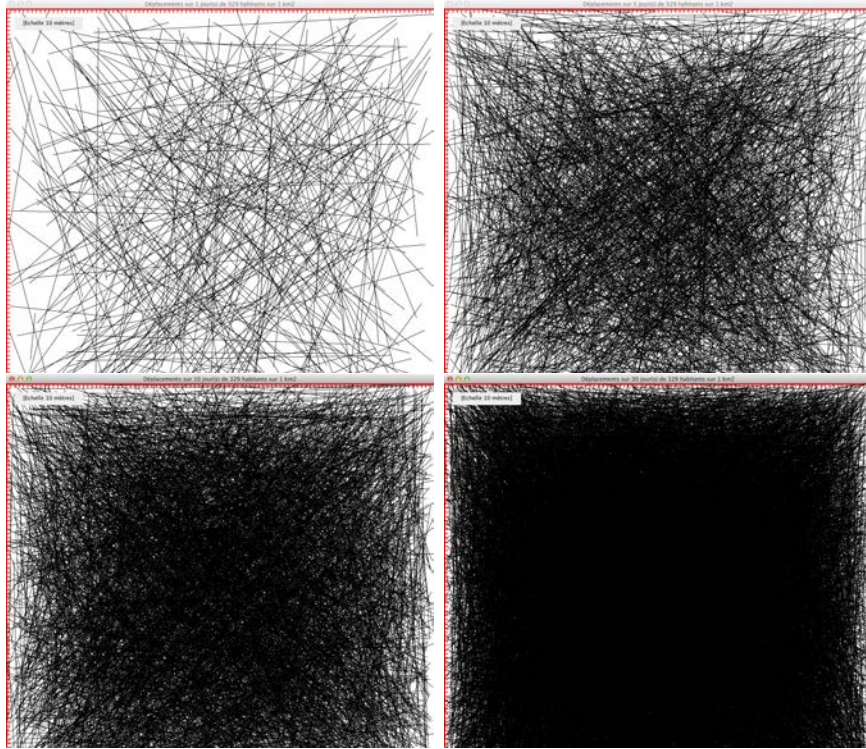
La méthode du crowdsourcing peut engendrer un nombre très important de résultats suivant le nombre de participants et suivant la problématique étudiée ainsi que la finesse des résultats attendus. Ce nombre augmentera d'autant plus si on effectue une analyse basée sur des mesures automatiques de logiciels représentant des évolutions temporelles d'usages quotidiens plutôt que sur des mesures manuelles et ponctuelles dispersées au fil du temps. Le crowdsourcing permet d'effectuer des mesures d'une granularité très fine et de mesurer de très larges territoires rapidement grâce à la dispersion géographique et à la mobilité effective qu'offrent les smartphones et leurs applications. Ces données récoltées devront par la suite encore être évaluées pour obtenir un système d'information exprimant une réalité physique mesurée. Plus le nombre de participants actifs sera important et plus le résultat sera précis rapidement. En statistiques, le résultat de l'étude d'une problématique regroupant plusieurs tests consécutifs est dit "statistiquement significatif" lorsqu'il est improbable que le résultat attendu de chaque test consécutif puisse être obtenu par le fruit du hasard dans 95% des cas. Autrement dit, il est nécessaire d'obtenir au minimum la valeur attendue dans 95% des cas pour que le résultat global soit considéré comme statistiquement significatif. Un très grand nombre d'appareils mobiles serait nécessaire pour atteindre ce degré de précision rapidement. Malgré cela, il est néanmoins possible d'atteindre des estimations très proches de la réalité en utilisant un nombre plus petit de smartphones qui mesureraient pendant une période plus longue. En effet, cette notion d'équilibrage statistique est décrite par le principe de l'ergodisme [80]. Celui-ci démontre qu'il est possible d'atteindre les mêmes résultats significatifs entre, d'une part, un grand nombre de mesures effectuées durant une certaine période et, d'autre part, un nombre moindre de mesures mais effectuées sur une période bien plus longue. Exemple simple du principe d'ergodisme : au lieu de lancer N dés différents, on lance N fois successivement le même dé.

## 2.3 Approximation du nombre de participants

Un système de crowdsourcing requiert la participation d'un certain nombre de personnes pour générer le résultat escompté dans une période de temps déterminée. La rapidité d'un résultat significatif est dépendant du rapport entre la période d'évaluation et le nombre de participants. Dans l'élaboration d'une cartographie dynamique représentant les concentrations des polluants particuliers, il n'est pas évident de prédire avec exactitude le nombre de personnes participantes qui permettra d'offrir une couverture géographique suffisante et représentative d'une certaine zone analysée pendant un temps limité. Il existe tant de facteurs différents qui rendent cette estimation difficile. Par exemple, les déplacements de chaque personne sont différents et d'une certaine manière aléatoires, la durée effective de participation au projet, les distributions temporelles de ces participations, la quantité de données collectées, etc. Dès lors, pour faire l'approximation de ce ratio temps/quantité, nous allons faire l'usage d'hypothèses fortes qui nous permettront d'abstraire ce problème d'évaluation. Les données de départ sont :

- La Belgique a une superficie d'environ  $30528 \text{ km}^2$  [19].
- Ce pays compte environ 11,2 millions d'habitants [19].
- La densité de population est ainsi de  $11200000 / 30528 = 366$  habitants par  $\text{km}^2$ .
- En 2014, il y avait 90% des Belges qui utilisaient quotidiennement l'accès à l'internet mobile. On pourrait considérer, par hypothèse, 329 crowdworkers par  $\text{km}^2$  [31].
- En moyenne, par jour, nous effectuons un déplacement de 38km avec l'utilisation de divers véhicules, voiture, moto, bus ou simplement le déplacement à pied. Ces 38km sont parcourus à l'aide de tout type de transport confondu [38].

Nous avons élaboré un petit programme de simulation graphique reprenant ces différentes données en entrée qui permettra de réaliser plusieurs représentations de déplacements pseudo-aléatoires de 329 personnes différentes. Nous avons décidé d'utiliser une fenêtre de programme de  $1000 \times 1000$  pixels pour simuler un kilomètre carré, cette superficie est ainsi représentée par un carré de fond blanc. L'extrapolation vers la superficie totale de la Belgique pourra se faire en multipliant simplement ce  $\text{km}^2$  généré par 30528  $\text{km}^2$ . Dans cette fenêtre, nous représenterons 329 lignes noires par jour pour simuler les directions pseudo aléatoires de déplacements. Nous avons simulé le déplacement de 329 personnes sur 1, 5, 10 et 30 jours. Nous prenons l'hypothèse que tous les déplacements sont rectilignes et l'hypothèse que le système de crowdsensing est stationnaire, ce qui permet de jouer sur la durée de l'expérimentation, ainsi le résultat final sera identique même si l'évaluation s'opère sur un ou plusieurs jours. La figure 2.2 suivante nous montre les résultats graphiques de ces simulations de déplacements à une échelle de 10 mètres sur les 2 axes.

FIGURE 2.2 – Simulations des déplacements de 329 personnes sur un  $km^2$ .

Nous pouvons constater que les 329 déplacements effectués sur un jour laissent encore apparaître de larges zones blanches non parcourues de plus de 10 mètres. Par contre, la simulation des déplacements sur une période de 5 jours nous montre une superficie mieux balayée avec des croisements de déplacements inférieurs à 10 mètres ce qui couvre raisonnablement le territoire. Les déplacements effectués sur 10 jours nous montrent des croisements encore plus serrés et sur 30 jours, on peut considérer que la superficie totale a été parcourue en entier. Cette première approximation pourrait nous indiquer un ratio à respecter entre la quantité de "crowdworkers" nécessaires à la réalisation d'une activité et la durée de la période d'évaluation.

- Soit, 1645 personnes / 1 jour.
- Soit, 329 personnes / 5 jours.
- Soit, 164 personnes / 10 jours.
- Soit, 82 personnes / 20 jours.
- Soit, 41 personnes / 40 jours.
- Soit, 20 personnes / 80 jours.
- etc...

## 2.4 Du crowdsourcing vers le crowdsensing

A l'heure actuelle, le modèle du crowdsourcing semble s'être immiscé dans un très grand nombre de secteurs : commercial, marketing, scientifique... Voir la figure en annexe 10.1. Il permet de mesurer n'importe quelle problématique de manière très précise. Le phénomène du crowdsourcing appliqué au domaine des smartphones permet de définir le terme du crowdsensing. Les smartphones et leur multitude de capteurs embarqués permettent de collecter diverses informations contextuelles à divers endroits ainsi qu'à divers moments. Ceux-ci sont alors transformés en petites sondes (sensor) de mesures de l'environnement.

Les principaux capteurs techniques que l'on peut actuellement recenser sont par exemple dans le cas du Samsung Galaxy S6 : la caméra, le microphone, l'accéléromètre, le système GPS, un capteur de température, un capteur barométrique, un interface d'empreinte digitale, un capteur gyroscopique, une boussole géomagnétique, un capteur à effet Hall (mesure de champ magnétique), un capteur biologique Heart Rate Sensor (Bio-Sensor), un capteur d'intensité lumineuse et un capteur de proximité.

La capacité à mesurer la qualité de l'air instantanément et de façon aussi simple qu'une pression sur un bouton n'est encore qu'au stade de la recherche. Des progrès constants sont apportés aux différentes technologies employées dans les méthodes de captation pouvant rendre ce type de service. Des recherches sur l'efficacité, la faisabilité, l'intégration, la consommation d'énergie et la fiabilité de réponse doivent encore être menées pour que ce type de capteur devienne aussi commun que ceux utilisés sur les smartphones aujourd'hui.

La conscientisation internationale de la problématique de la pollution atmosphérique n'est pas récente et a commencé vers les années 1970 mais permettre de la mesurer au travers des smartphones dotés de capteurs particuliers agissant comme sonde personnelle est une tendance active depuis 2005 grâce au phénomène de crowdsourcing et à l'accès simplifié à l'électronique et aux microcontrôleurs. Plusieurs projets d'évaluation de la pollution atmosphérique, se basant sur des capteurs externes, émergent et proposent plusieurs manières d'intégrer ce type de mesure. Ces différents projets, recensés dans la section suivante, prônent la citoyenneté, le partage public de l'information collectée et son accès facilité via des plateformes internet collectives.

## 2.5 Plusieurs projets de mesures de pollution

Ces différents projets collaboratifs ont pour mission la collecte et le partage d'informations liées à la pollution environnementale. Leur rôle premier est d'informer le public sur la qualité de l'air qu'il respire et dans lequel il évolue ainsi que l'impact sur la santé des taux de polluants mesurés dans l'atmosphère. Les techniques de capteurs employés sont centrées sur des composants bon marché pour la plupart. La liste des projets suivants n'est pas exhaustive.

**Allairgoo** [17] est une application collaborative qui permet d'obtenir des alertes personnalisées et de notifier par exemple aux personnes asthmatiques ou souffrant d'allergies des zones géographiques polluées à éviter. Allairgoo propose des cartographies "map" sur lesquelles les zones polluées sont référencées. A des échelles plus grandes, il permet la diffusion d'informations concernant le degré de pollution constaté sur un territoire lors de catastrophes. Le module associé "Zlikabox" est un boîtier externe contenant des capteurs de pollutions (COV, CO (Monoxyde de carbone) et particules (PM10, PM25)).

**Aircasting** [3] est un projet collaboratif de collecte et de partage d'informations physiologiques et de pollution environnementale dirigé par l'organisation écologiste HabitatMap [11] en partenariat avec City Tech's MTC et le New York Hall of Science. Cette application se base sur les données récoltées par un capteur optique de particules (Air-Beam) ainsi que sur des capteurs physiologiques. De plus, elle propose des accessoires de visibilité directe du degré de pollution mesuré avec par exemple, une lampe multi-couleur type LED ou un gilet LED pouvant afficher une certaine couleur en fonction du taux de pollution mesuré. Nous pouvons remarquer que cette application effectue un lien entre la physiologie du corps humain et un contexte de pollution mesuré. L'essence de l'application est d'informer le public et les dirigeants politiques afin de prendre les décisions nécessaires faisant des participants du projet des citoyens actifs à l'amélioration de la vie communautaire.

**CitySense** [51] est un projet de recherche de l'Université de Californie. Il a commencé en décembre 2012. Ce projet a réalisé un prototype de mesure de divers polluants gazeux. Ce petit boîtier communique en Bluetooth de manière continue avec un smartphone pour fournir des informations de pollutions ambiantes en temps réel. Ce capteur est capable de détecter les concentrations locales d'ozone  $O_3$ , de dioxyde d'azote  $NO_2$  et de monoxyde de carbone CO. Le prix de ce prototype est d'environ 1000\$.

**Kit** [42] est un projet en cours de développement à la Karlsruhe Institute of Technology. Il a été initié en 2014. Ce projet a pour but d'estimer la quantité de pollution particulaire au travers d'analyses photographiques. Le prototype est constitué d'un smartphone sur lequel est adapté un capteur de particule Sharp. Ce capteur sera décrit dans la partie expérimentale de ce mémoire à la page 66. Cependant, le capteur est détourné et utilisé d'une manière alternative. Le smartphone utilise les impulsions lumineuses provenant de son flash pour remplacer la LED émettrice interne du capteur. Ensuite, le smartphone prend une photographie de l'intérieur du capteur. La photo générée est ensuite analysée pour déterminer la quantité de particules en suspension. La figure 2.3 suivante nous illustre son principe.

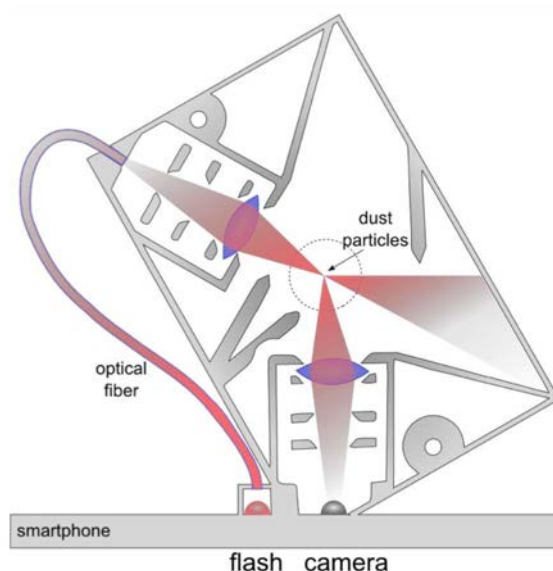


FIGURE 2.3 – Illustration du concept KIT [42].

**Visibility** [41] est un projet de l'école d'ingénieur Viterbi associé à l'Université de Californie initié en 2010. Il s'agit d'une application expérimentale permettant de déterminer la qualité de l'air en se basant sur son opacité. L'application prend une photographie d'une partie de ciel et l'envoie à un serveur distant qui déterminera la qualité de l'atmosphère après avoir analysé l'image. Une fois l'analyse terminée, l'application reçoit un message en retour qui informe l'utilisateur de la qualité de l'air dans lequel il se trouve. La figure 2.4 suivante nous montre l'interface du programme android "Visibility".

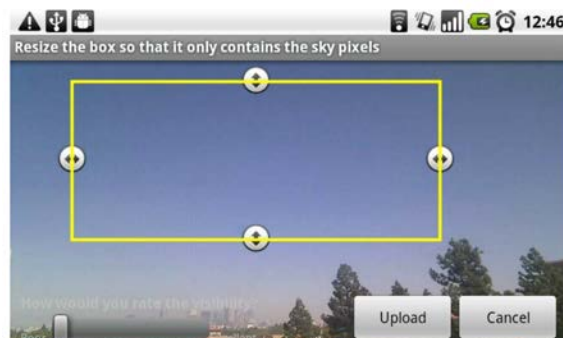


FIGURE 2.4 – Interface utilisateur de Visibility [41].

**MicroPem** [40] est un projet scientifique mené en 2012 par l'association "RTI International" en Caroline du Nord (USA) et soutenu par le "National Institute of Environmental Health Sciences". "PEM" est l'acronyme de Personal Exposure Monitor. Il s'agit d'un module de mesure particulaire qui se porte lors des activités physiques quotidiennes comme la marche, le jogging, etc. Le but de ce projet était d'estimer la quantité de particules respirées lors de ces différentes activités quotidiennes.

**Airqualityegg** [4] est une plateforme collaborative d'informations publiques sur la qualité de l'air. Le capteur d'intérieur (Egg) est commercialisé et est directement relié à cette plateforme publique. Le capteur coûte environs 240\$ et contient des capteurs de dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , de monoxyde de carbone  $\text{CO}$ , de température et d'humidité. Ce projet informe les utilisateurs de la qualité de leur air intérieur.

**CitizenAir.io** [32] est un projet démarré en Avril 2014. Il provient de l'association "Citoyens Capteurs" à Paris en partenariat avec les regroupements de type Fablab "hackEns" et "Fabelier". Ce projet vise à développer un réseau "citoyen" de capteurs de la pollution de l'air et opère sous la surveillance des Agences Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Le but de ce projet est de déployer des outils de qualité scientifique de mesure de la pollution de l'air et de fournir les données en temps réel sur le site <http://www.citizenair.io>.

## La pollution atmosphérique

### 3.1 Introduction

La composition chimique de l'atmosphère dépend du lieu et de l'altitude. Cette composition est fonction des phénomènes météorologiques qui forment les circulations des masses d'air. De façon générale, elle peut être décomposée en constituants majeurs comme l'oxygène, l'azote, l'eau, les gaz rares et en constituants secondaires responsables du phénomène d'effet de serre qui sont principalement le dioxyde de carbone, le méthane et l'ozone. L'atmosphère est aussi constituée de poussières ou particules qui ont une concentration qui s'affaiblit avec l'altitude [75]. La figure 3.1 nous permet de constater les différents dosages des constituants qui forment notre atmosphère à une centaine de mètres d'altitude, l'azote, l'oxygène, l'eau, le méthane et le gaz carbonique étant les plus concentrés allant de  $10^0$  à  $10^{-6}$  de l'ordre du ppm. Un grand nombre d'autres gaz et particules de poussières sont présents en concentrations volumiques moindres de l'ordre du ppb allant de  $10^{-6}$  à  $10^{-9}$ , voire encore plus petit de l'ordre du ppt allant de  $10^{-9}$  à  $10^{-12}$ .

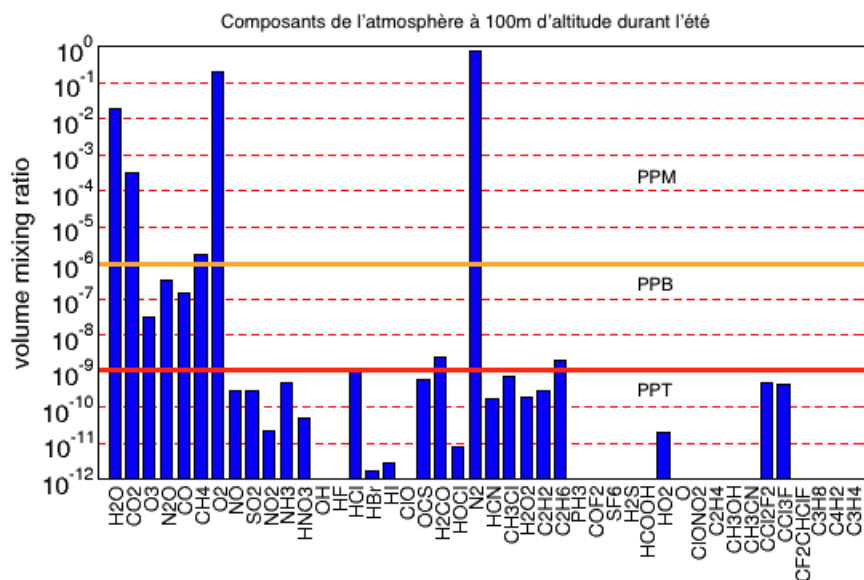


FIGURE 3.1 – Les constituants gazeux de l’atmosphère de 0 à 100 m d’altitude [56].



Les surdosages de certains de ces gaz polluants étant à l'origine de problèmes et complications de la biosphère de l'être humain, ils devront faire l'objet d'une mesure la plus exacte possible pour rendre compte des tenants et aboutissants de leurs teneurs et impacts. Dès lors, pour atteindre ces niveaux infimes de mesure, les capteurs de gaz et particules devront être capables de détecter des variations volumiques de l'ordre du ppm pour les constituants gazeux majeurs et particules et de l'ordre du ppb pour les gaz  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  et de l'ordre du ppt pour les gaz d'une quantité plus petite que  $10^{-9}$ . Si les capteurs ne peuvent atteindre ce degré de détection de variations infimes, certains gaz et particules seront totalement invisibles.

La pollution atmosphérique se définit par la présence d'une certaine quantité de polluants gazeux et particules en suspension. Ces constituants en surdosage peuvent être la cause d'effets nocifs, oxydants, dangereux pour la santé et pour l'environnement. Ces polluants trouvent leurs origines soit dans la nature avec, par exemple, les feux de forêts, les éruptions volcaniques ou autres activités naturelles de rejet soit dans l'activité humaine. Pour cette dernière, les progrès industriels et les émissions provenant des processus de combustion ont eu un impact important sur l'aggravation de la concentration de certains types de composés dans l'atmosphère dégradant la qualité de l'air. Depuis quelques décennies, des études [84][86] ont montré un lien entre la dégradation de l'environnement et la santé humaine [67], avec la présence de polluants dans l'atmosphère. Selon l'OMS [57], cette pollution de l'air extérieur est actuellement rendue responsable du décès d'environ 3,3 millions de personnes et ce, chaque année, dans les villes les plus exposées du monde [86].

Depuis 1970, la population mondiale a augmenté de 3 milliards de personnes pour atteindre aujourd'hui 7 milliards d'individus. Cette croissance de l'humanité s'est accompagnée d'une pollution de l'environnement et d'un épuisement des ressources naturelles qui, à terme, pourraient compromettre ce développement humain [85]. Deux milliards supplémentaires d'individus sont estimés à l'horizon 2050 ce qui amplifiera encore la quantité de pollution mondiale. L'OCDE estime que sans nouvelles politiques plus prononcées d'ici 2050, la qualité de l'air en milieu urbain continuera à se dégrader à l'échelle mondiale et la pollution de l'air extérieur sera la première cause de décès à cause des particules en suspension. Selon le scénario de référence de l'OCDE, le nombre de décès prématurés dus à l'exposition aux particules et à l'ozone troposphérique devrait plus que doubler au niveau mondial, voir le graphique d'exposition aux particules à la figure 10.6 et le graphique d'exposition à l'ozone à la figure 10.7. La Chine et l'Inde étant les plus touchés, ces pays atteindront les 3,6 millions de décès en 2050, voir la figure des décès prématurés 10.2. Les projections du taux de population urbaine exposée aux particules pour 2050 sont alarmantes, voir le graphique des concentrations urbaines à la figure 10.8. Les pays de l'OCDE seront grandement touchés suite au vieillissement des populations et les années à venir

devraient voir les principales économies émergentes (BRICS) émettre de fortes émissions de dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  et de dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , voir le graphique des projections d'émissions de polluants pour 2050 à la figure 10.3.

## 3.2 Pollution primaire et secondaire

Les substances polluantes sont réparties en 2 catégories, à savoir les polluants primaires et les polluants secondaires. Les polluants primaires proviennent directement d'une source polluante identifiable. Citons par exemple, le monoxyde de carbone  $\text{CO}$  provenant des gaz d'échappement des véhicules, le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  provenant des processus de l'industrie, le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  provenant de la respiration humaine, l'oxyde d'azote  $\text{NO}$  et dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$  provenant des processus de combustions à hautes températures.

Les polluants secondaires sont formés par plusieurs polluants primaires dits précurseurs. Ces polluants secondaires ne sont pas émis directement par des sources identifiées mais se forment dans l'air à la suite de réactions chimiques entre différents composés émis par des sources polluantes primaires et l'oxygène, l'eau ou la lumière solaire. L'exemple majeur est l'ozone troposphérique avec les pics d'ozone en période chaude ou les pics de smog photochimique en période froide mais nous pouvons citer également les espèces suivantes  $\text{COV}$ ,  $\text{NPA}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ .

La présence des polluants secondaires est difficile à réguler car leur existence ne provient pas directement des activités humaines. Un polluant indirect peut être formé en se basant sur des polluants primaires transportés et émis par des sources distantes. La problématique de pollution atmosphérique revêt d'une importance cruciale face aux conséquences directes ou indirectes sur la santé humaine et sur l'environnement. La pollution de l'air existe aussi bien en atmosphère extérieure qu'en atmosphère intérieure.

## 3.3 Sources extérieures

En atmosphère extérieure, les polluants les plus néfastes sont les suies et particules fines (PM) et l'ozone troposphérique ainsi que leurs constituants précurseurs qui permettent leur formation [68]. Les scénarios de référence de l'OCDE pour quelques grandes nations, en annexe, nous montre la figure 10.4 pour les projections de concentrations en particules et la figure 10.5 pour les projections de concentrations d'ozone troposphérique.

### 3.3.1 Particules PM

Les particules (PM) liquides ou solides sont de deux types : les particules primaires émises directement dans l'atmosphère comme le carbone noir (CN) et les particules secondaires qui sont formées dans l'atmosphère à partir d'une réaction avec d'autres gaz à savoir l'ammoniac, les oxydes d'azote  $\text{NO}_x$ , le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  et les composés organiques volatils (COV). Les effets des particules sur la santé sont par exemple, des irritations oculaires et respiratoires, des maladies cardiovasculaires ou le cancer du poumon. Ces particules sont classifiées en 4 types selon leur diamètre [68].

- **PM10** - particules en suspension d'un diamètre aérodynamique inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .
- **PM2.5** - particules fines en suspension d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2.5  $\mu\text{m}$ .
- **PM1** - particules très fines en suspension d'un diamètre aérodynamique inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .
- **PM0.1** - particules ultrafines en suspension d'un diamètre aérodynamique inférieur à 0.1  $\mu\text{m}$  ou nanoparticules.

Leurs différentes tailles leur permettent de s'infiltrer plus ou moins profondément dans l'appareil respiratoire du corps humain et provoquer ainsi les effets cités plus haut. Il est évident que ce sont les particules les plus fines qui sont les plus pénétrantes et les plus inquiétantes [30]. Quelques exemples de différentes tailles de particules se trouvent en annexe 10.14 page 115. Selon une étude de l'OMS (2009) et sur une échelle mondiale, l'exposition aux particules fines provoque des décès à hauteur de 8% pour le cancer des poumons, 5% pour les maladies cardiovasculaires et 3% pour les infections respiratoires [85]. L'augmentation des concentrations des particules en suspension est corrélée avec l'augmentation de ces maladies. Seules les particules de type PM10 et PM2.5 sont réglementées et régulées par les directives européennes.

<b>Particules en suspension PM10 – PM2.5</b>	
<b>Source origine</b>	Combustions industrielles et domestiques, transport routier carburant diesel, origine naturelle des volcans et de l'érosion. PM10 - particules de diamètre inférieur à 10 µm filtrées aux niveaux des voies respiratoires supérieures, nez, pharynx. PM2.5 - particules fines de diamètre inférieur à 2.5 µm pénétrant profondément jusqu'aux alvéoles pulmonaires.
<b>Impact environnement</b>	Contribuent aux salissures des bâtiments impliquant des coûts important de nettoyage s'élevant à plusieurs milliards.
<b>Impact santé</b>	Irritation et altération de la fonction respiratoire. Ces particules peuvent être combinées à d'autres substances toxiques et cancérogènes comme les métaux lourds et les hydrocarbures. Cela augmente le taux de mortalité dû à cette pollution.

### 3.3.2 Ozone troposphérique O<sub>3</sub>

L'ozone troposphérique O<sub>3</sub> est un gaz de la basse atmosphère. Il est créé par une réaction chimique entre la lumière solaire et des gaz précurseurs comme les oxydes d'azote, les composants organiques volatils ou bien le méthane. Ce gaz apparaît aussi bien comme polluant que comme élément naturel de l'atmosphère. A des altitudes plus élevées, son rôle est de filtrer les rayonnements ultraviolets nocifs et au niveau du sol, il est dangereux pour la santé, les végétaux et certains matériaux. Dans certaines conditions, la relation entre l'ozone et les oxydes d'azote a parfois un rôle d'amplificateur ou de formation ou bien un rôle d'absorbeur ou de destruction. Paradoxalement, l'ozone est moins présent en ville qu'à la campagne. Le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> produit par les échappements des véhicules donne naissance à l'ozone tandis que le monoxyde d'azote NO produit aussi par les gaz de combustion, permet de diminuer sa concentration dans l'air. Les zones vertes comme les forêts, plus souvent présentes en zones rurales, contribuent aussi à favoriser ce type de pollution. Ce qui entraîne souvent la création de pics d'ozone dans les campagnes [30].

Durant le début du mois de juillet 2015, nous avons pu assister en zones rurales, aux dépassements du premier seuil d'alerte de 240 microgrammes par mètre cube et ce dans plusieurs des 41 stations de mesure de pollution du réseau belge CELINE. Une exposition trop longue à l'ozone engendre des déficiences au niveau pulmonaire mais également des troubles cardiovasculaires. Durant les périodes de fortes concentrations d'ozone (Les pics d'ozone de l'été), il est ainsi recommandé d'éviter de trop bouger et de rester chez soi pour ne pas inhaler trop de ce gaz oxydant. Selon EEA, en 2010, 20 000 décès étaient liés

à l'exposition de l'ozone en Europe.

<b>Ozone O<sub>3</sub></b>	
<b>Source origine</b>	Polluant secondaire créé dans l'atmosphère sous les effets du rayonnement solaire et par réactions complexes entre certains polluants primaires NO <sub>x</sub> , CO, COV et principal indicateur de l'intensité de la pollution photochimique.
<b>Impact environnement</b>	Perturbe la photosynthèse et diminue le rendement de l'agriculture. Nécrose les feuilles d'arbres, oxyde divers matériaux comme le caoutchouc et le textile et contribue à renforcer l'effet de serre.
<b>Impact santé</b>	Gaz irritant pour le système respiratoire ainsi que pour les yeux. Son intensité est associé à une augmentation de la mortalité.

Les principales sources d'ozone troposphérique et de particules en suspension sont le secteur de l'énergie (CN, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>), le secteur des transports (NO<sub>x</sub>, COV, PM), la combustion de charbon et de bois des foyers domestiques (CN, PM), l'élevage, l'agriculture, le traitement des déchets avec des rejets de méthane et le traitement des eaux usées.

Les concentrations d'ozone et de particules peuvent être augmentées par des effets de transport des polluants dans l'atmosphère. Un polluant émis à un endroit particulier peut se retrouver transporté par les phénomènes météorologiques sur de longues distances et provoquer ainsi des surdosages à d'autres endroits plus lointains. L'impact d'un polluant est fonction de la distance qu'il va parcourir et de son cycle de vie. Par exemple, les particules peuvent être dispersées sur une distance de 1000 km, les gaz précurseurs de l'ozone peuvent voyager encore plus loin. Les oxydes d'azote peuvent parcourir 10 km, le monoxyde de carbone plus de 10000 km et le méthane 1000000 km [85]. Ces deux derniers peuvent rester respectivement 3 mois et de 8 à 10 ans dans l'atmosphère, ce qui fait d'eux des menaces planétaires. Selon des études de CEE-ONU (2010), les concentrations d'ozone ont doublé dans l'hémisphère nord durant la seconde moitié du vingtième siècle à cause des hausses d'émissions anthropiques. Toujours selon les perspectives de l'OCDE [85], des modèles de dispersion planétaire des pollutions montrent qu'une diminution de 20% de ces émissions anthropiques en Amérique du Nord, en Asie Orientale et Asie du Sud, permettrait d'abaisser les concentrations d'ozone en Europe d'environ 0.6 ppb, soit à peu près autant que la baisse de 0.8 ppb qui permettrait d'atteindre une diminution de 20% des émissions européennes. L'analogie de cette constatation de cause à effet serait le principe des vases communicants. En abaissant de 50% les émissions anthropiques mondiales de méthane, on diminuerait de moitié les pics d'ozone constatés aux Etats-Unis.

### 3.3.3 Les oxydes d'azote NO<sub>x</sub>

Les oxydes d'azote sont des polluants primaires et secondaires. Le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub> et l'oxyde d'azote NO sont des constituants majeurs de l'atmosphère terrestre. Le NO<sub>2</sub> est un gaz brun-rouge toxique issu des procédés de combustion internes comme les moteurs et les centrales thermiques. Il résulte de l'oxydation de l'azote de l'air par l'oxygène sous haute température. ( $\text{Azote} + \text{O}_2 = \text{NO}_2$ ) Il est un précurseur de l'acide nitrique HNO<sub>3</sub> responsable des pluies acides lors de son hydratation par l'eau. Le dioxyde d'azote est un irritant pulmonaire et une concentration de 0.5 ppm suffit pour induire des effets respiratoires nocifs. Selon l'OMS, lors d'expositions prolongées, les personnes souffrant d'obstruction pulmonaire ou d'asthme seront les plus rapidement impactées mais seules de très hautes concentrations ont pour conséquences des effets sanitaires. Comme ce gaz est issu de combustion de moteur, on le retrouve dans les zones de forte circulation routière. Les oxydes d'azotes constituent un indicateur de la pollution urbaine, de foyers de combustion (centrale) et du trafic routier [68][30].

Oxydes d'azote NO <sub>x</sub> (NO et NO <sub>2</sub> )	
<b>Source origine</b>	Combustion hautes températures des matières fossiles comme le charbon, le fioul, l'essence. Le monoxyde d'azote NO polluant primaire est rejeté par les pots d'échappement, s'oxyde dans l'oxygène et se transforme en dioxyde d'azote NO <sub>2</sub> à 90%.
<b>Impact environnement</b>	Rôle précurseur de la formation d'ozone dans la troposphère, contribue aux pluies acides qui affectent les végétaux et augmente la concentration de nitrates dans le sol.
<b>Impact santé</b>	Le dioxyde d'azote est irritant pour le système respiratoire et favorise la gravité des crises d'asthme ainsi que des infections pulmonaires infantiles. L'oxyde d'azote est non toxique dans des concentrations environnementales normales.

### 3.3.4 Les oxydes de carbone CO<sub>x</sub>

Ces gaz résultent de combustion incomplète des combustibles fossiles. Ces gaz sont également toxiques pour la santé et peuvent causer des asphyxies mortelles à hautes concentrations. Ils sont présents dans les villes, les abords d'autoroutes et sont un indicateur de pollution atmosphérique pour le trafic routier [68][30].

<b>Monoxyde de carbone CO et CO<sub>x</sub></b>	
<b>Source origine</b>	Combustions incomplètes de gaz, charbon, fioul ou bois dues à des installations mal réglées et provenant principalement des gaz d'échappement des véhicules.
<b>Impact environnement</b>	Participe à la formation de l'ozone, se transforme en gaz carbonique CO <sub>2</sub> et contribue à l'effet de serre.
<b>Impact santé</b>	Intoxications à fortes teneurs provoquant maux de tête, vertiges pouvant aller jusqu'au coma ou à la mort suite à une exposition prolongée. Le CO se fixe à la place de l'oxygène dans le sang.

### 3.3.5 Le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>

Le dioxyde de soufre est produit naturellement par les volcans mais il est également produit par les procédés industriels comme les industries métallurgiques ou les raffineries. Il est toxique pour tous les êtres vivants. Ce gaz aide à la création de particules de types aérosols sulfuriques empêchant les rayons solaires d'atteindre la surface de la terre, il a donc un rôle de refroidisseur de la planète [68]. Ce gaz est un indicateur des émissions d'origine industrielle [30].

<b>Dioxyde de soufre SO<sub>2</sub></b>	
<b>Source origine</b>	Industrie, combustions de combustibles fossiles contenant du soufre comme le fioul, le charbon, la lignite, le gazole (diesel). Les volcans émettent également des composés soufrés naturellement.
<b>Impact environnement</b>	Contribue aux pluies acides affectant les végétaux, le sol et la pierre.
<b>Impact santé</b>	Irritations des muqueuses de la peau et des voies respiratoires supérieures.

### 3.3.6 Composés organiques volatils COV - HAP

Selon la directive européenne 2008/50/CE, les composés organiques volatils proviennent des sources anthropiques et biogènes. Ils produisent des oxydants photochimiques par réaction avec des oxydes d'azote sous l'effet du rayonnement solaire. Selon la directive 1999/13/CE, les COV sont définis comme étant des composés organiques contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs éléments parmi l'hydrogène, l'halogène, l'oxygène, le soufre, le phosphore, le silicium ou l'azote à l'exception des oxydes de carbone et

des carbonates et bicarbonates inorganiques. Ils ont une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293 degrés Kelvin (20 degrés) ou une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières (Hydrocarbures aromatiques polycycliques). Ces composés volatils peuvent être classés en 4 grandes catégories : les hydrocarbures saturés, les hydrocarbures insaturés, les composés chlorés et les BTEX (benzène, toluène et xylène). L'émission des COV provient de différentes sources intérieures ou extérieures. En atmosphère extérieure, citons par exemple les combustions incomplètes des moteurs, l'évaporation de produits raffinés, l'utilisation de solvants ou encore de peintures. Les COV [30] sont des gaz à effet de serre et des précurseurs de l'ozone troposphérique. Leur présence provoque l'augmentation de concentrations d'ozone dans l'atmosphère. Leur volatilité leur permet de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission. Ils peuvent donc avoir des impacts directs et indirects [68]. Quelques COV liés à l'atmosphère intérieure seront développés ultérieurement 3.4.2 page 32.

---

**Hydrocarbures aromatiques polycycliques - HAP**  
**Composés organiques volatils - COV**

---

<b>Source origine</b>	Combustions incomplètes ou utilisations de solvants, produits de nettoyage, remplissage de réservoirs ou citernes à essence.
<b>Impact environnement</b>	Précurseur de la formation de l'ozone ainsi que d'autres produits oxydants.
<b>Impact santé</b>	Effets divers selon le polluant dont irritation et diminution de la capacité pulmonaire.

---

## 3.4 Sources intérieures

En atmosphère intérieure, c'est à dire en espace clos, la pollution domestique est très diverse et répandue mais n'est pas moins dangereuse. Les concentrations de polluants varient dans l'espace et dans le temps dans des proportions dynamiques car les sources sont très nombreuses, certaines d'entre elles sont intermittentes ou ont des zones d'accumulation et des réservoirs. Nous passons en moyenne plus de 20 heures dans un espace clos (domicile, transport, travail) à respirer un air intérieur [46]. Des conséquences néfastes pour la santé peuvent apparaître si celui-ci est pollué et non ventilé. De plus, nous consommons environ 15 m<sup>3</sup> d'air quotidiennement, soit près de 20kg. L'appareil respiratoire est une voie d'exposition privilégiée pour les aéro-contaminants. Les conséquences possibles sur la santé peuvent être des allergies, des inflammations pulmonaires ou encore de l'asthme. Certains gaz toxiques comme le chlore ou l'ozone altèrent la barrière cellulaire de protection des voies respiratoires et favorisent la pénétration de certains allergènes et microparticules dans le corps. Il est admis que l'air intérieur insuffisamment



ventilé est cent fois plus pollué que l'air extérieur [59]. Cette pollution intérieure est créée par l'usage de la cuisine et produits ménagers, du chauffage au bois ou charbon et tous types de combustions comme les bougies, les huiles parfumées ou le tabac, des émanations de substances chimiques par le mobilier (formaldéhyde), les moquettes et revêtements de sols, l'humidité trop importante et les moisissures, par le non renouvellement de l'air vicié, etc. L'ancien projet HITEA a effectué une étude menée par un consortium qui était constitué de huit institutions de recherche de sept états membres de l'Union Européenne pour évaluer l'impact des polluants domestiques sur la santé [65]. Cette étude a mis en relation l'exposition à des polluants perturbateurs et polluants fongiques dus à l'humidité et les impacts sur la santé respiratoire dans les écoles et les logements. Selon l'OMS cette pollution de l'air intérieur est responsable du décès de quelques 3,5 millions de personnes par an suite aux conséquences de mauvaises combustions [58]. Les polluants contaminant l'air intérieur se répartissent en 4 classes : les polluants biologiques, chimiques, de combustion et physiques [74].

### 3.4.1 Les polluants biologiques

L'air intérieur contient une grande variété de particules d'origine biologique cependant ce sont les micro-organismes qui ont les effets les plus significatifs. Ces micro-organismes sont les virus, les bactéries, les champignons, les protozoaires (organismes unicellulaires). L'air contient également des grains de pollens, des phanères animaux (poils, tissus, etc.), des fragments d'insectes ou acariens et leurs excréments. Les acariens, les animaux de compagnie, les blattes sont les sources principales des allergènes se trouvant dans les habitations. Un air insuffisamment ventilé, une humidité trop importante et un nettoyage peu fréquent sont des facteurs d'accumulation de ces polluants biologiques.

### 3.4.2 Les polluants chimiques

L'air intérieur contient aussi une quantité importante de composés chimiques. Ces contaminants chimiques se manifestent sous la forme de gaz, de vapeurs inorganiques ou organiques, d'aérosols et de matières particulaires. Leurs concentrations très dynamiques varient en fonction du temps. Les principaux gaz polluant l'air intérieur sont : le dioxyde de carbone provenant de la respiration d'êtres humains, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote provenant de combustions inorganiques, l'ozone produit par photochimie en quantité plus réduite par rapport à l'air extérieur et une centaine de composés organiques volatils différents.

#### - Le formaldéhyde

Substance émise par les résidus de résines utilisées pour fabriquer des meubles en particules de bois, contreplaqués et matériaux de finition, bois agglomérés, panneaux isolants

autoportants, peintures, papiers peints, colles, adhésifs, produits d'entretien, cosmétiques, produits corporels. Par exemple, dans le cas de bois particulaire, la teneur de ce polluant dans la substance émettrice diminue au fil du temps, de l'ordre de huit à neuf mois pour descendre à 50%, mais ensuite la diminution ne s'atténue que très lentement. On peut considérer un état émetteur en continu en très légère diminution progressive. Le taux d'émission peut cependant être plus important lors de forte chaleur et de forte humidité. Le formaldéhyde est très volatil et se dissout très facilement avec les molécules d'eau, il sera facilement absorbé par le système respiratoire. Dès son absorption dans le corps humain, il se transformera en acide formique (irritation des muqueuses) et en dioxyde de carbone.

### - Composés organiques volatils

Selon l'institut scientifique de santé publique [74], plus de 500 COV sont présents dans les bâtiments. Ces composés sont classés en quatre catégories ; les composés organiques très volatils (COTV), les composés organiques volatils (COV), les composés organiques semi-volatils (COSV) et les composés organiques liés aux matières particulaires. Les composés en phase dite particulaire sont absorbés par les matières particulaires. Ces composés organiques apparaissent sous la forme de vapeurs ou de particules selon leur volatilité. Par exemple, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) lorsqu'ils sont composés de deux noyaux benzéniques soudés (Naphtalène) sont présents en phase gazeuse tandis que si ils sont composés de cinq noyaux (Benzoapyrène) se trouvent en phase particulaire. La majorité des COV sont émis par des produits chimiques pour l'entretien ménager, notamment les nettoyeurs, les colles, les parfums d'ambiance, la peinture ou produit de lessive. Les COV sont des indicateurs de la présence d'autres éléments plus nuisibles pour la santé. Certains de ces composés étant neurotoxiques, cancérigènes ou tératogènes. Voici quelques COV très répandus :

**Terpènes** : Les terpènes sont des hydrocarbures contenant essentiellement des atomes de carbone et d'hydrogène. Ce COV réagit avec l'ozone pour engendrer d'autres composés gazeux ou particulaires favorisant des irritations respiratoires et oculaires et à de plus fortes concentrations pouvant aller jusqu'à des céphalées, des nausées et vomissements voire même un coma.

**Phtalates** : Les phtalates sont des contaminants courants dans l'air et la poussière. Ces COV se retrouvent dans des produits de consommation, des adhésifs, revêtements de sols de type vinyle et d'objets plastiques, des huiles, détergents et solvants. L'exposition aux phtalates peut provenir de l'air, de l'eau ou de la nourriture. Ces composés aérosols ne sont pas volatils sur une longue durée (Déodorants ou cosmétiques). Les effets toxiques sont fonction de leurs types et de leurs concentrations. Certains phtalates ont des effets

de perturbateurs endocriniens.

**Benzène** : Le benzène est un hydrocarbure aromatique monocyclique utilisé dans l'industrie et pour la synthèse de médicaments, plastiques, caoutchouc synthétique ou colorants. C'est un constituant naturel du pétrole brut synthétisé par d'autres composés présents dans le pétrole. Ce COV est formé par la combustion, la vapeur d'essence, la fumée de cigarette, la fumée d'encens ou encore les produits de bricolage. Une inhalation trop importante peut causer la mort et une exposition moindre peut occasionner des vertiges, de la somnolence, un rythme cardiaque plus élevé, des maux de tête, etc. Une exposition chronique à de faibles doses dans les lieux de résidence peut engendrer des allergies, des endommagements de moelle osseuse, une anémie ou une leucémie.

**Naphtalène** : Le naphtalène ou naphtaline est un hydrocarbure aromatique polycyclique utilisé dans l'industrie comme solvant, additif de carburant ou anti-corrosion. Il est également utilisé dans des matériaux de construction, des produits pharmaceutiques, produits agricoles, solvants pour peinture, boules anti-mites, ... Ce composé se place dans les tissus graisseux humain et passe dans le lait maternel. Il induit des anémies, des problèmes au foie, des cataractes, des irritations cutanées et oculaires.

**Pesticides** : Ces composés sont semi-volatils et leurs concentrations dépassent rarement le microgramme par m<sup>3</sup>. Ils ont tendance à contaminer la poussière et à être absorbés par les différents matériaux intérieurs. Ces substances sont utilisées pour éliminer les nuisibles et sont toxiques et irritants. L'accumulation de ces composés et une exposition chronique peut entraîner des céphalées, des vertiges, des nausées, des faiblesses musculaires, des irritations des yeux, du nez, de la gorge, des lésions neurologiques et rénales ainsi que le cancer.

### 3.4.3 Les polluants de combustion

Ces polluants sont identiques à ceux de l'atmosphère extérieure décrits plus haut. Nous y retrouvons le dioxyde d'azote, le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone et les matières particulaires.

### 3.4.4 Les polluants physiques

Les polluants physiques sont par exemple : l'humidité, la ventilation, la température, l'infiltration du radon, l'amiante, les sources de champs électromagnétiques. Ceux-ci, n'étant pas liés à la problématique de ce mémoire, ne seront pas développés.

---

### Normalisation des émissions de pollution

---

La dangerosité des polluants de l'atmosphère a conduit l'Union Européenne à réfléchir sur des objectifs à atteindre pour obtenir un air plus sain. Elle a édicté des normes et des directives pour limiter, contrôler et surveiller les émissions polluantes des sources anthropiques. Sa politique sur la qualité de l'air a démarré dans les années 1960 avec les particules en suspension et dans les années 1970 en établissant les premières normes concernant les gaz d'échappement des voitures afin de protéger la santé humaine et l'environnement. Cependant la pollution est un problème complexe et mondial et difficile à évaluer car elle ne tient pas compte des frontières et peut potentiellement être diluée ou transportée sur de très longues distances par les vents et phénomènes météorologiques.

L'émission de polluants d'autres pays membres accroît la problématique de la qualité globale de l'air au sein de l'Union Européenne. Ces autres régions ont souvent recours à des technologies plus anciennes et à des normes moins strictes quant aux quantités et substances émises tolérées. Les conséquences de taux trop élevés de certains gaz ou particules ont des effets désastreux sur l'environnement et sur la santé humaine. Les polluants, générés ou amplifiés, interagissent entre eux pour former des substances irritantes et oxydantes qui s'immiscent dans l'écologie de la planète affectant la santé, l'environnement et le climat.

Il convient d'aborder cette problématique par l'intermédiaire de coopérations aux niveaux européen, international et mondial. En 1979, la coopération internationale s'est concentrée sur l'élaboration de la Convention sur la Pollution Atmosphérique Transfrontière à Longue Distance (CPATLD) organisée par la commission économique des Nations Unies. Cette convention fut adoptée par des pays européens, les Etats-Unis et le Canada. Aujourd'hui, 51 pays membres font partie de cette convention internationale qui, au fil du temps, a établi des protocoles et normes visant à maîtriser les émissions des principaux polluants atmosphériques [20].

Cette pollution transfrontière longue distance est un problème mondial dû aux déplacements et transports potentiels de différents polluants. Cette dispersion est à l'origine de phénomènes comme l'acidification, l'eutrophisation, les polluants organiques persistants (POP) et le développement de l'ozone troposphérique. Au cours des années 1970 et 1980, les pluies acides ont occasionné le dépérissement et les dégradations des forêts et des lacs du nord de l'Europe et de l'Amérique. L'acidification du sol a été créée par ces pluies

acides et ce, depuis plus de vingt ans. Aujourd'hui le problème s'atténue mais reste d'actualité et sous surveillance. Ce phénomène d'acidification se produit lorsque du dioxyde de soufre et dioxyde d'azote se combinent aux molécules d'eau présentes dans l'atmosphère pour former des acides sulfuriques et nitriques. Ces pluies acides permettent à ces acides de s'infiltrer dans le sol. Ces agents modifient lentement mais profondément la composition du sol, portant de graves atteintes aux végétaux, aux matériaux et aux êtres vivants. L'eutrophisation est créée par le dépôt de composés d'oxyde d'azote et d'ammoniac sur le sol. Ce phénomène engendre une dérégulation des processus et des cycles écologiques suite à un apport excessif de substances nutritives, comme l'azote et le phosphore. De trop importantes quantités d'azote attaquent la vitalité des forêts, peuvent influencer négativement la qualité des cultures, font diminuer la biodiversité et contribuent à la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines.

Au niveau européen, plusieurs directives sur la qualité de l'air ambiant ont été promulguées, révisées et renforcées durant ces quarante dernières années. Ces directives ont eu pour but d'établir des cadres de travail sur l'analyse, la maîtrise et la compréhension des émissions polluantes ainsi que les facteurs et influences sur l'exposition humaine aux polluants. Voir le tableau répertoriant les directives européennes à la figure 10.9.

Les coopérations internationales et décisions politiques européennes de ces dernières décennies ont permis une amélioration sensible de la qualité de l'air. Le tonnage des principales espèces chimiques émises depuis le début des années 2000 a presque été réduit de moitié [68]. De nouvelles normes visant à promouvoir et à améliorer les technologies des véhicules et les émissions du secteur industriel ont permis cette réduction de pollution. Par exemple, les émissions de dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  qui sont les principales causes de pluies acides dans les années 1980 ont été réduites de plus de 80% actuellement. Cependant, les taux de particules fines ( $\text{PM}_{2.5}$ ), d'ozone troposphérique et de dioxyde d'azote sont de plus en plus préoccupant et à l'origine de graves effets sanitaires et nuisances de milieux naturels.

L'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA) a créé une base de données "Air-Base v.8" répertoriant les valeurs mesurées de la qualité de l'air des pays membres. L'EEA définit des seuils-limites et analyse les évolutions afin de créer les projections de taux de pollution. Ces données sont récoltées grâce à des réseaux de stations de mesures statiques disséminées à différents endroits stratégiques. Il existe des réseaux de stations pour les zones rurales, les zones urbaines, pour les endroits où le trafic de véhicules est important et également des stations implantées dans les zones industrielles [77].

La législation européenne établit régulièrement plusieurs rapports sur les émissions de polluants (NEC), sur les objectifs de valeurs à ne pas dépasser pour garantir une certaine

qualité de l'air ainsi que sur le temps d'exposition des citoyens aux divers polluants [77]. Les polluants principaux sont émis par l'activité humaine. Les émissions proviennent de la combustion de matières fossiles pour générer de l'électricité, le transport ou le chauffage domestique mais également par les processus industriels utilisant des solvants ou autres matériaux, par le secteur de l'agriculture, par des causes naturelles comme les éruptions volcaniques, par le pouvoir de dispersion de poussières par les vents et pluies ou encore l'émission naturelle de composés organiques volatils (COV) par les végétaux.

La dernière étude de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a établi un lien direct entre les décès d'origine cardiovasculaire et respiratoire et les dosages élevés de particules fines associés à une exposition à long terme. Une analyse récente de la Commission Européenne nous informe qu'en 2010, 420000 personnes sont décédées prématurément en raison de la pollution de l'air au sein de l'Union Européenne. Selon l'EEA plus de 80% de la population urbaine est exposée à des taux de particules dépassant les recommandations de l'OMS (2005) sur la qualité de l'air, cette exposition réduit en moyenne de huit mois à deux ans l'espérance de vie selon les endroits les plus pollués.

Les écosystèmes sont aussi touchés par la pollution atmosphérique. L'ozone troposphérique dégrade les récoltes agricoles, les forêts et les plantes en perturbant leur taux de croissance. Les oxydes d'azote  $\text{NO}_x$ , le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  et l'ammoniaque  $\text{NH}_3$  ont un impact sur les sols, les lacs et rivières en les acidifiant, ce qui entraîne des perturbations sur la faune et la flore. Un processus d'eutrophisation se forme suite à un apport excessif d'azote nutritif. Les sites européens protégés "Natura 2000" ont été estimés comme étant à deux tiers affectés par la pollution atmosphérique.

Ces dégradations de qualité de l'air imposent de prendre des mesures supplémentaires pour réduire l'impact de la pollution. L'agence européenne pour l'environnement a mis à disposition du public un site internet permettant de connaître différents scénarios de projections sur les impacts de la pollution sur la santé, l'environnement et l'économie [35]. Le scénario de base permet une projection pour 2020, 2025, 2030 des impacts dans le cas où les réglementations actuelles sont respectées mais qu'aucune mesure supplémentaire n'est ajoutée pour améliorer la qualité de l'air à l'avenir.

Par exemple, nous pouvons y remarquer qu'en Belgique, selon le scénario de base, le nombre annuel de décès prématurés liés à la pollution de l'air en Europe sera d'environ 8263 décès pour 2020 (environ 23 personnes/jour), 7596 décès pour 2025 (environ 21 personnes/jour) et 7535 décès pour 2030 (environ 21 personnes/jour). Ce plafonnement permet de comprendre qu'on atteindra un état relativement figé et que la diminution deviendra très faible et les mesures inefficaces au cours du temps.

Un second scénario de projection montre que respecter les nouvelles mesures européennes proposées actuellement permettrait d'atteindre 8358 décès pour 2020 (23 personnes/jour), 7352 pour 2025 (20 personnes/jour) et 6326 pour 2030 (17 personnes/jour), ce qui montre une réduction quasi linéaire jusqu'à l'horizon 2030.

Un troisième scénario encore plus ambitieux permettra d'atteindre des valeurs encore plus basses. Les projections pour 2020 et au-delà sont alarmantes et imposent le développement et la mise en pratique de nouvelles mesures pour améliorer la qualité de l'air et ce de façon continue en fonction de mesures réglementées sur le terrain. Les objectifs de la qualité de l'air sont répertoriés dans le tableau 10.9 en annexe.

## Méthodes et mesures normalisées

La directive européenne 2008/5/CE préconise des méthodes spécifiques pour la mesure de chaque polluant. La normalisation des méthodes permet d'accéder aux niveaux de degré de détection requis permettant d'évaluer précisément les concentrations des gaz cibles. Le tableau 5.1 présente les différentes méthodes de mesure pour chaque polluant en mentionnant la norme associée devant être respectée [68].

Gaz	Méthode de mesure	Intervalles de détection	Normes de qualité
NO <sub>x</sub>	chimiluminescence	NO <sub>2</sub> 0 à 500 µg/m <sup>3</sup> NO de 0 à 1200 µg/m <sup>3</sup>	EN 14211 (2005)
CO	rayonnement infrarouge non dispersif	0 à 1000 mg/m <sup>3</sup>	EN 14626 (2005)
O <sub>3</sub>	photométrie par UV	0 à 500 µg/m <sup>3</sup>	EN 14625 (2005)
SO <sub>2</sub>	fluorescence par UV	0 à 1000 µg/m <sup>3</sup>	EN 14212 (2005)
COV	prélèvement et chromatographie	0.5 pg/m <sup>3</sup> à 50 pg/m <sup>3</sup> 0.5 µg/m <sup>3</sup> à 50 µg/m <sup>3</sup> 0.5 pg/m <sup>3</sup> à 50 pg/m <sup>3</sup>	EN 14662-1 (2005) EN 14662-2 (2005) EN 14662-3 (2005)
PM10 PM2.5	prélèvement et gravimétrie	< 10 µm < 2.5 µm	EN 12341 (2014) NF EN 14907 (2008)

TABLE 5.1 – Les différentes méthodes normalisées pour les gaz réglementés [68].

Selon ces normes et directives établies, des stations fixes ou mobiles (camions ou remorques) d'analyses automatiques sont développées permettant de relever les différents taux de polluants ciblés. En Belgique, les trois régions sont bien sûr confrontées à la pollution de l'air et chacune a ainsi développé son propre réseau de stations de mesure de la qualité de l'air. L'Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC) a confié cette mission à l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) [50]. En région de Bruxelles-Capitale, c'est Bruxelles Environnement (IBGE) [43] qui se charge de l'évaluation de la qualité de l'air et en région flamande, c'est la "Vlaamse Milieumaatschappij" (VMM) [28]. "La Cellule



inter-régionale pour l'environnement" (CELINE) [48] est un accord de coopération entre l'Etat belge, la Région wallonne, la Région de Bruxelles-Capitale et la Région flamande. Cette cellule se penche sur la structuration des données environnementales destinées à l'Agence européenne pour l'environnement EEA. Le réseau CELINE rassemble et propose des renseignements détaillés et actuels sur la qualité de l'air de toutes les stations en Belgique via un site internet [48] ainsi que des informations sur les dépassements de normes et de valeur seuil en lien avec la législation européenne. Ce réseau effectue une agrégation d'informations provenant des trois réseaux télémétriques de mesures régionaux qui permettent de suivre en permanence et en temps réel l'évolution des concentrations en polluants dans l'air ambiant national.

## 5.1 Réseaux de stations fixes

Les directives européennes concernant la qualité de l'air imposent aux pays membres de mettre en place des réseaux de mesures nationaux [47] pour évaluer la qualité de leur air. Les pays membres ont chacun la responsabilité d'évaluer et de communiquer aux instances supérieures comme l'agence européenne pour l'environnement, les événements, valeurs et informations des différents polluants générés. Ils ont aussi l'obligation de mettre en place des protocoles de communication publique pour les épisodes d'alertes [8]. La constitution et la collection des données récoltées dans les différentes stations fixes accroissent la quantité de données permettant des alertes, analyses, prévisions et projections aux niveaux nationaux et européen. Ces collectes d'informations permettent l'étude d'importantes séries de données spatio-temporelles contribuant significativement à la compréhension et la connaissance des phénomènes de pollution.

Pour la région wallonne, il existe aussi un site public par lequel il est possible de connaître toutes les valeurs recueillies par toutes les stations référencées [2]. Ainsi, au niveau national, plusieurs réseaux de surveillance existent et se superposent pour constituer un maillage représentatif en fonction des milieux urbains ou industriels les plus polluants. Les gestionnaires de ces réseaux ont obtenu des accréditations qui leur permettent d'effectuer les services de mesure adéquats selon les normes en vigueur. Les premières stations wallonnes furent installées dès 1968. Depuis lors, ce réseau a connu plusieurs modifications structurelles et fonctionnelles. Ces dernières années, des stations ont été supprimées ou déplacées et de nouvelles stations ont été installées. La nature et le nombre de paramètres mesurés par station ont également évolué dans le but de s'adapter aux directives européennes et d'améliorer la connaissance de certaines problématiques. L'appareillage des stations a évolué au cours du temps en fonction des progrès apportés aux systèmes de détection et de télé-transmission. Aujourd'hui, le réseau géré par l'ISSeP compte 23 stations comptant 82 analyseurs de polluants répartis dans chacune d'elles et 8 de ces 23 stations sont aussi équipées de capteurs météorologiques.

## — Réseau télémétrique (TM)

Le Réseau Télémétrique est un réseau de surveillance et d'alerte en temps réel, réparti sur tout le territoire wallon. Ces stations sont équipées d'analyseurs spécifiques dosant en continu et en temps réel certains polluants contenus dans l'air ambiant. Les données transmises toutes les heures par ligne téléphonique sont centralisées au sein d'un serveur central situé à Liège pour être ensuite analysées et traitées. Une procédure de téléchargement de fichiers envoie ensuite automatiquement les données vers les sites d'information sur la qualité de l'air : <http://air-quality.issep.be> et [www.irceline.be](http://www.irceline.be). Les polluants analysés dans ces stations sont le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$ , les oxydes d'azote  $\text{NO}_x$ , l'ozone  $\text{O}_3$ , le monoxyde de carbone  $\text{CO}$ , le mercure gazeux  $\text{Hg}$ , les particules en suspension  $\text{PM}_{10}$   $\text{PM}_{2.5}$   $\text{PM}_1$  et le carbone noir  $\text{CN}$ . Dans certaines stations, les paramètres météorologiques sont également mesurés comme la température, l'humidité relative, la pression atmosphérique, les précipitations, la vitesse et la direction du vent. Les paramètres mesurés dans chaque station dépendent de son type environnemental. Les espèces gazeuses susceptibles d'être présentes seront différentes dans le cas de zone industrielle, urbaine ou rurale.

Le choix des implantations des stations du réseau télémétrique a été effectué en fonction de deux critères généraux : l'importance du risque d'exposition pour la population et le souhait d'assurer une couverture la plus large possible du territoire en se basant sur un maillage régulier. Selon l'ISSEP, en Wallonie la densité des stations est plus élevée à Charleroi et Liège qui sont les deux plus grandes villes et les bassins industriels les plus importants de la Région. Les résultats obtenus depuis 1968 montrent que ces zones à forte densité de population sont les plus exposées par des sites industriels augmentant ainsi les pollutions inhérentes domestiques et provenant du trafic routier. D'autres stations ont été installées dans des zones rurales éloignées de toute source ponctuelle importante. Ces stations assurent la surveillance de la pollution de fond et permettent de suivre l'impact des polluants liés au transport à plus longue distance. Il existe plusieurs types de stations : type urbaine pour une aire représentative de 100m à 2km, périurbaine pour une aire de 1 à 5km, rurale régionale pour 5 à 25km, industrielle pour 100m à 5km, trafic pour une aire de 10m à 50m et un type d'observation plus spécifique avec une aire de représentativité selon les besoins [68]. Ces stations mesurent des paramètres physiques comme la vitesse du vent et la température à différentes hauteurs, l'humidité relative, la pluviométrie et des paramètres chimiques. Il n'y a que le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$  qui est mesuré dans toutes les stations. Les autres paramètres sont mesurés en fonction de leur nécessité, de leur localisation et re-

présentativité qu'imposent les directives de l'Europe. Conformément à la directive 2008/5/CE, la concentration des polluants est mesurée de manière normalisée, voir le précédent tableau 5.1. Le dioxyde de soufre est mesuré par fluorescence UV, les oxydes d'azote sont mesurés par chimiluminescence, l'ozone est mesuré par absorption de lumière ultraviolette, le monoxyde de carbone est mesuré par absorption infrarouge, les microparticules PM<sub>10</sub> PM<sub>2.5</sub> et les COV sont évaluées par prélèvements et échantillonnages en temps réel.

— Réseau fumées (SF)

Ce réseau comporte actuellement 3 stations de mesures qui analysent les fumées noires, les particules noirâtres, les suies, présentant des dimensions suffisamment petites pour demeurer en suspension dans l'air. Ces composants sont principalement constitués de produits de combustion. Ce réseau a été installé en 1968 pour assurer la surveillance générale de la qualité de l'air, et plus spécialement la pollution causée par l'utilisation de combustibles fossiles pour la production d'énergie et pour le chauffage des habitations et bâtiments. Le prélèvement est réalisé sur filtres journaliers en cellulose. La méthode d'analyse est la réflectométrie.

— Réseau poussières sédimentables (PS)

Ce réseau compte 129 points de collecte de poussières. En fonction de leur taille et de leur densité, les poussières émises dans l'air peuvent rester en suspension ou retomber au sol plus ou moins rapidement. Les particules grosses et lourdes sédimentent rapidement causant des dégradations sur l'environnement immédiat des sources. Ces poussières, dites sédimentables, se définissent comme étant toutes les particules se retrouvant dans une jauge de dépôts de type « OWEN » qui est un genre de collecteur en forme d'entonnoir. Une spectrométrie de masse [13] couplée à un plasma inductif (ICP/MS) est ensuite effectuée pour analyser le contenu de ce prélèvement sédimentaire. Les poussières sédimentables représentent un risque toxique direct faible pour l'homme. Elles constituent avant tout une nuisance par les dégradations qu'elles provoquent sur les bâtiments, les végétaux, le paysage. Cette détérioration du cadre de vie est fortement ressentie par les riverains et fait l'objet de nombreuses plaintes, d'autant plus qu'elle est souvent liée à d'autres dommages collatéraux (bruits, vibrations, charroi, ...). Les poussières sédimentables ont également une portée toxicologique indirecte car les polluants qu'elles contiennent potentiellement peuvent s'accumuler dans les sols et dans les écosystèmes. La Région Wallonne est largement confrontée au problème étant donné la part importante d'industries émettrices comme les sidérurgies, les carrières, les cimenteries, souvent imbriquées avec des zones urbaines.

---

— Réseau métaux lourds - Plomb et Nickel (ML)

Ce réseau de mesures est constitué de 13 stations permanentes. Les composés métalliques sont émis dans l'atmosphère soit par des sources naturelles soit par les activités humaines, telles que la combustion fossile, la métallurgie ou encore l'incinération des déchets. Ces composés se répartissent en deux catégories : d'une part, les éléments traceurs (Ca, Si, Fe, Mg, ...), dont la toxicité est faible, mais dont les proportions permettent de déterminer l'origine des poussières et la responsabilité du secteur producteur et, d'autre part, les éléments toxiques, dont font partie les métaux lourds. Contrairement à la première catégorie, ces éléments se retrouvent à l'état de traces et doivent faire l'objet d'une surveillance plus particulière pour des raisons sanitaires. Le prélèvement est réalisé sur des filtres journaliers en nitrate de cellulose. La méthode d'analyse est la spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF) [24]. Ce réseau n'est plus aux normes en vigueur car il ne permet pas de mesurer les PM10 et métaux lourds s'y concaténant. Cependant, l'ISSeP a conservé ce réseau pour sa capacité à analyser un très grand nombre de filtres, la méthode d'analyse ne nécessitant aucun traitement de préparation préalable. Cela est principalement très utile lors des campagnes ponctuelles pour la caractérisation d'une zone et la recherche des sources polluantes.

— Réseau métaux lourds - Plomb arsenic cadmium nickel (EM)

Ce réseau consiste en 17 stations de mesures similaires au réseau ML mais en plus il est capable d'évaluer les métaux lourds dans les particules PM10. Il utilise également la méthode d'analyse par spectrométrie de fluorescence X à dispersion de longueur d'onde (WDXRF). Ce réseau est conforme à la directive européenne 2004/107/CE du 15 décembre 2004 et permet de mesurer le plomb, l'arsenic, le cadmium et le nickel dans l'air ambiant.

— Réseau fluor (RF)

Ce réseau contient 8 stations de prélèvement et permet d'évaluer la quantité de composés fluorés présents dans l'air, sous la forme d'acide fluorhydrique, de fluorures gazeux ou particuliers, ou encore de fluorures solubles. Le prélèvement est réalisé sur filtres journaliers en nitrate de cellulose prétraités. La méthode d'analyse en laboratoire est la potentiométrie avec électrode spécifique.

— Réseau retombées humides (PA)

Ce réseau comporte 10 stations de mesure (1 point de mesure pour les métaux lourds et 1 point de mesure pour le mercure). Il est aussi appelé le réseau « pluies acides » car, dès sa conception, il n'analysait que l'acidification de l'atmosphère. Actuellement, ce réseau évalue également les métaux lourds et le mercure dans les retombées humides. Comme précédemment mentionné, les émissions de dioxyde de soufre, d'oxydes d'azote et d'ammoniac peuvent se décomposer dans l'air en composés ayant une caractéristique acide. Les conséquences d'une acidification environnementale ou pluies acides se traduisent par des dégradations des bâtiments, une altération de la santé des végétaux, une perturbation des écosystèmes ainsi que la dégradation de la qualité des eaux et des sols. Cette acidification du sol s'effectue de deux manières ; d'une part, les retombées sèches, sous forme de gaz et de poussières, et d'autre part, les retombées humides, sous forme de neige, pluie ou brouillard. Le réseau pluies acides est destiné à quantifier la fraction humide des retombées en polluants acidifiants. Les prélèvements se font par remplissage de bouteille relevé de façon hebdomadaire. La méthode d'analyse en laboratoire est la chromatographie ionique. Bien qu'il n'y ait pas de réglementation imposant directement la mesure des retombées humides, ce réseau fait partie d'un réseau supérieur qui est celui de la convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue portée (CPATLD).

— Réseau composés organiques volatils (VO)

Le réseau de détection des COV contient 16 stations de prélèvements. Nous avons vu au point 3.3.6 qu'il existe une très grande variété de composés organiques volatils. Ils peuvent provenir de sources naturelles comme les végétaux, les forêts ou d'activités anthropiques. Certains de ces composés sont soit volatils dans les conditions ambiantes soit non volatils, ils peuvent cependant être ou non très persistants dans le temps. La détection de ces composés est d'une importance cruciale car ils sont précurseurs de la formation de l'ozone troposphérique. Le prélèvement est réalisé grâce à des tubes à phases d'adsorption spécifiques, c'est à dire que l'espèce cible va se fixer sur une surface solide contenue dans un tube. La méthode d'analyse en laboratoire est la chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. L'analyse des COV est un indicateur de santé publique.

— Réseau de station européen (EMEP)

Le programme européen EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) est un programme de la convention sur la coopération internationale pour résoudre les problèmes de pollution transfrontière « Convention on Long-range Transboundary Air Pollution ». Ce réseau européen s'intéresse à la surveillance de la qualité

de l'air et des dépôts dans les zones éloignées de sources de pollution ainsi qu'aux inventaires des émissions de polluants et la modélisation du transport et du dépôt de polluant atmosphérique. La station de Vielsalm a été accréditée comme station faisant partie du programme EMEP. A cette fin, les paramètres mesurés sont progressivement adaptés pour répondre aux exigences de l'EMEP [36].

— Réseau mobile (RM)

Le réseau de type mobile permet de mesurer la qualité de l'air ambiant dans des zones où aucune station de mesure n'existe. Il s'agit de la mise en place de remorques contenant du matériel analytique performant, compatible avec les exigences demandées et normes en vigueur. Le réseau mobile regroupe les techniques de détection des différents autres réseaux fixes mais aussi d'autres détecteurs pour l'ammoniac, le sulfure d'hydrogène, les poussières et sédiments ou les COV (BTEX) en continu. Ce réseau mobile regroupe 16 remorques, 4 stations compactes et de nombreux systèmes de prélèvements, analyseurs et autres matériels analytiques pouvant être installés de manière indépendante et rapide selon les besoins. Certaines analyses du réseau mobile sont sous-traitées en interne dans les différents réseaux de la cellule qualité de l'air. En outre, la mobilité de ces systèmes permet de répondre à des problèmes ponctuels de pollution, d'expliquer des dépassements de valeurs constatés dans le réseau fixe, de mieux comprendre des sites à caractéristiques locales, de fournir des données pour des zones peu étudiées, de valider les modèles d'extrapolation et de dispersion et de réaliser des études préliminaires avant installation d'une station fixe ou avant mise en service d'une infrastructure routière ou d'une industrie.

Nous pouvons noter que le concept de ce type de structure mobile rejoint l'idée d'utilisation de système auxiliaire comme les applications de smartphones, qui serait en mesure d'ajouter un niveau de précision et de résolution dans l'évaluation globale d'une zone géographique. La différence majeure réside dans le niveau de précision de la détection des espèces gazeuses car les remorques du réseau mobile sont des prolongements de laboratoires professionnels. Elles contiennent du matériel imposant et de haute précision. De plus, elles n'ont pas le caractère "low-cost" que peuvent avoir les capteurs grand public joints aux smartphones.

### 5.1.1 Mesure temps réel

Les mesures en temps réel sont effectuées par le réseau télémétrique. Celui-ci est constitué d'appareils qui enregistrent de façon continue plusieurs relevés de valeurs par minute. Les polluants suivants sont évalués ; le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$ , les oxydes d'azote NO et  $\text{NO}_2$ , l'ozone  $\text{O}_3$ , les oxydes de carbone CO et  $\text{CO}_2$ , les particules en suspension PM10

et PM2.5, le mercure Hg et les COV suivants BTX (benzène, toluène et xylène). Les stations équipées de ces appareils envoient en temps réel via des lignes téléphoniques les mesures enregistrées vers le laboratoire régional. Ce type de réseau permet dès lors d'informer rapidement la population de l'évolution de la qualité de l'air qu'elle respire. Ceci est d'autant plus important en été, en cas de risque élevé de pollution à l'ozone.

### 5.1.2 Mesure différée

Les mesures différées sont utilisées par les laboratoires qui cherchent à obtenir une plus grande résolution en ajoutant des tubes passifs ou filtres qui absorbent et s'imprègnent des constituants nocifs de l'atmosphère. Ce type de mesure fonctionne avec des appareils qui captent des échantillons d'air. Ces échantillons sont relevés périodiquement pour être analysés. On peut mesurer les polluants suivants ; les composés organiques volatils COV et hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP, les poussières, fumées noires et suies, des métaux lourds comme le plomb (Pb), cuivre (Cu), thallium (Tl), arsenic (As), nickel (Ni), chrome (Cr), manganèse (Mn), antimoine (Sb), cadmium (Cd) mais également des agents acidifiants qui sont le dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>, l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), le fluorure (HF) et le chlorure (HCl). Ce type de mesure permet d'obtenir, après analyse en laboratoire, une valeur journalière pour la concentration dans l'air des différents polluants.

Ces différents réseaux de mesure permettent d'alimenter des pollumètres, par exemple, le pollumètre de l'IBGE [44]. Ces pollumètres sont des instruments publics d'information de la qualité de l'air. Ils permettent, grâce aux informations du réseau d'agrégation CE-LINE, de surveiller le respect des valeurs seuils fixées par la législation européenne car, en cas de dépassement de ces valeurs, des procédures d'information obligatoire de la population doivent être respectées.

### 5.1.3 Indice de qualité - BelAtmo

Les données collectées provenant de tous les réseaux permettent la réalisation de cartographie reprenant les différentes valeurs dans l'espace et le temps. Un indice global est établi périodiquement pour faciliter la compréhension de l'état global de l'air d'une zone géographique. L'indice agglomère des résultats techniques de mesures sous une forme compréhensible par le plus grand nombre, permettant d'avoir une appréciation plus ou moins fine de la qualité de l'air ambiant. En France, il existe l'indice "Atmo", voir le tableau 10.10 en annexe, pour la Belgique un indice quasi similaire existe aussi et se nomme "BelAtmo", voir le tableau 10.11 se trouvant en annexe. Aux Etats-unis, l'indice se nomme "AQI" pour Air Quality Index [5]. Nous pouvons remarquer que les échelles des intervalles de valeurs sont légèrement différentes. L'indice représente, en un seul chiffre et couleur, les concentrations de plusieurs polluants mesurés de l'air ambiant. L'échelle de graduation

va de 1, pour une qualité de l'air excellente, jusqu'à 10, pour une qualité exécrationnelle.

Pour la Belgique, la détermination de la valeur de cet indice est calculée à partir des données obtenues dans les réseaux téléométriques qui mesurent en continu la qualité de l'air des trois Régions. Des tableaux journaliers sont consultables sur internet [9]. Nous pouvons y trouver des valeurs par grandes agglomérations (indice urbain) ainsi qu'un résultat plus global national (indice général). Les deux indices sont calculés à partir des teneurs en ozone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre et particules PM10. Une "valeur caractéristique" est calculée chaque jour pour ces quatre polluants et peut être comparée à une échelle de concentration qui leur est spécifique. Les échelles de concentration pour SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> et les PM10 sont basées sur les nouvelles directives européennes pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air. En fonction du nombre de dépassements autorisés, les nouvelles valeurs limites européennes correspondent à des valeurs d'indice de 6, 7 ou 8. Les autres degrés de l'échelle ont été choisis en fonction de la distribution des concentrations mesurées en 1997, 1998 et 1999 dans les réseaux des trois Régions.

## 5.2 Techniques d'analyses des polluants

La réflectométrie [22] est une méthode de diagnostic utilisant un émetteur radar. Un signal sonde est envoyé dans le milieu à diagnostiquer, ce signal se propage selon les lois de propagation et lorsqu'il rencontre une discontinuité d'impédance, une partie de son énergie est renvoyée vers l'émetteur. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire les informations de concentration sur le milieu analysé.

La potentiométrie avec électrode spécifique permet la mesure d'une différence de potentiel entre deux électrodes dans un électrolyte à analyser, typiquement un filtre imbibé d'une certaine substance chimique [7].

La chimiluminescence se base sur un phénomène lumineux apparaissant suite à une réaction chimique qui produit une molécule avec un niveau d'énergie excité. Cette excitation moléculaire crée un rayonnement lumineux lorsque la molécule revient à un niveau d'énergie non excité [69]. Dans la pratique, il s'agit de capsule ou bâtonnet contenant un solide chimique qui va réagir de façon lumineuse en fonction du gaz cible.

La spectrométrie de fluorescence X [23] est une méthode d'analyse chimique utilisant la propriété physique de fluorescence de rayons X de la matière. Le principe de base est qu'en bombardant de la matière de rayons X, la matière réagit en émettant un certain spectre de lumière et de rayons X. Le spectre des rayons X ré-émis par la matière est caractéristique de ses composants. La technique de la fluorescence UV est similaire en utilisant cette fois les longueurs d'ondes du spectre ultraviolet.



L'analyse par gravimétrie est un ensemble de méthodes d'analyse chimique quantitative effectuées en déterminant par pesée la masse d'un produit. Cette masse est déterminée par un système capteur de micro balance QCM (Quartz Crystal Microbalance) et peut être formée (augmentation de masse) ou éliminée (diminution de masse) par des procédés chimiques d'adsorption, absorption ou désorption, oxydation, précipitation, réduction, condensation solide (gaz vers solide), sublimation inverse (gaz vers liquide) ou de l'état liquide vers gazeux [18].

Le rayonnement infrarouge non dispersif est une spectroscopie DOAS ( Differential Optical Absorption Spectroscopy) ou photométrie se basant sur la lumière infrarouge et sur la loi d'absorption de Beer-Lambert [75] (Voir 6.2.4). Le principe de base est que certains types de molécules de gaz vont absorber une certaine quantité connue de lumière générée. Cette absorption par un certain gaz s'effectue à une ou plusieurs longueurs d'ondes spécifiques, ces longueurs d'ondes sont une empreinte unique du gaz. La lumière résiduelle est filtrée selon le type de gaz cible et la proportion de lumière qui a été absorbée par le gaz représente la quantité de gaz qui est présente dans l'air.

La photométrie ultraviolet est également une spectroscopie DOAS se basant sur les longueurs d'ondes de l'ultraviolet [75].

La chromatographie en phase gazeuse permet de scinder les molécules d'un mélange complexe de natures diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Le mélange à analyser est vaporisé à l'entrée d'une colonne de séparation. Celle-ci renferme une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire. Le gaz analysé est transporté dans cette colonne à l'aide d'un gaz porteur ou vecteur. Les différentes molécules du mélange vont se séparer et sortir de la colonne les unes après les autres après un certain temps qui est fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules.

La chromatographie à échanges d'ions est une technique du type chromatographie en phase liquide. Il s'agit d'un procédé qui permet d'isoler une substance chargée électriquement, le polluant cible, d'un mélange de molécules chargées, les retombées humides. Pour cela, on effectue un certain nombre d'échanges d'ions dans une colonne de séparation. Ces échanges créent plusieurs niveaux d'amplitude de signal, ceux-ci dépendent de la conductivité équivalente des ions, des charges et des concentrations. Ce procédé permet de détecter les différents composants d'un mélange et leurs concentrations.

Spectrométrie de masse : technique instrumentale d'analyse reposant sur la séparation, l'identification et la quantification des éléments constitutifs d'un échantillon en fonction

de leur masse.

La figure suivante 5.1 reprend les principales techniques utilisées pour quelques types de gaz polluants en ajoutant leur temps de réponse d'obtention d'une valeur, leurs avantages et inconvénients. Il est important de remarquer que les temps de réponses sont au minimum de l'ordre de la minute. Il existe un compromis entre la qualité et la précision de la mesure et son temps de réponse.

Technique utilisée	Gaz détecté	Minimum détectable	Temps de réponse	Avantages	Inconvénients
Chromatographie en phase gazeuse	COV (selon détecteur et colonnes)	$\ll 1$ ppm	5 à 40 min	Sensible, spécifique	Etalonnage nécessaire, peu portable, méthode destructive
Spectrométrie de masse	Tout composé sous forme gazeuse	ppb à ppm	$\approx 1$ min	Sélective, sensible, quantification	Matériel lourd, interprétation de spectres
Absorption infrarouge	CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCl, HC	$\approx$ ppm	$\approx 1$ min	sélective, sensible	Interférence avec vapeur d'eau
Chimiluminescence	NO, NO <sub>2</sub>	1 ppb	$\approx 1$ min	Très spécifique	Maintenance et étalonnage délicat, méthode destructive
Fluorescence	SO <sub>2</sub>	$<0.1$ ppm	$\approx 1$ min	Peu d'interférence	Spécifique SO <sub>2</sub>

FIGURE 5.1 – Récapitulatif des méthodes d'analyse d'espèce gazeuse [68].

Ces différents procédés d'analyse de polluants sont réalisés soit en situation soit en laboratoire spécialisé et ce, en utilisant un appareillage sophistiqué et de haute précision. L'avantage majeur de ces systèmes est leur précision et leurs inconvénients majeurs sont leurs prix et une mobilité réduite. Ce matériel a un coût important de mise en service. Nous n'avons pas pu trouver de chiffre représentatif d'un coût de déploiement mais celui-ci doit se situer entre plusieurs milliers d'euros à plusieurs centaines de milliers d'euros. L'utilisation de ce type de matériel est réservée à des techniciens spécialisés dans les études de pollution et d'émissions de tout type d'espèce gazeuse. Examinons à présent les différents types de capteurs de pollution et particulièrement les capteurs qui pourraient potentiellement être adaptés dans un design de smartphones de par leur taille limitée. Nous pourrions ainsi nous rendre compte de la faisabilité de leur intégration ou non.

## Capteurs de pollution "low-cost"

### 6.1 Introduction et motivation

Comme nous venons de le voir, les gestionnaires de réseaux fixes ou mobiles de mesures de pollution utilisent un maillage de stations fixes relativement étendu de l'ordre du kilomètre ou dizaine de kilomètres. Ces stations de collectes de haute précision sont finement disposées à des points stratégiques, proches ou non des sources, la distance étant dépendante de l'espèce gazeuse mesurée et du contexte légal européen. La mesure de l'ozone  $O_3$  se fera par exemple plutôt en zone rurale qu'en zone urbaine en raison du phénomène d'absorption et de transformation par les oxydes d'azote  $NO_x$ . A l'inverse, des détecteurs de  $SO_2$  se trouveraient plutôt proches des zones industrielles. Quant aux détecteurs de  $NO_2$  ils se trouveraient proches du trafic routier.

Les méthodes normalisées de mesure à haute précision de la pollution utilisées requièrent des instruments surdimensionnés, sophistiqués et complexes. La précision de ces appareillages est déterminée par les normes européennes obligatoires. Ces stations représentent un coût de déploiement important, d'où leur nombre restreint, et un coût de maintenance important car celle-ci est effectuée par des techniciens qualifiés. Les équipements des stations sont contrôlés en laboratoire pour les étapes de calibration. Ce genre d'appareillage offre un degré de précision très important et très fiable et peut de manière très sélective détecter les espèces gazeuses présentes dans l'atmosphère. Les mesures peuvent être instantanées, continues ou déterminées plus tard en laboratoire pendant les analyses des substrats d'absorption des composés recueillis. Lorsqu'une évaluation de la qualité de l'air est souhaitée sans qu'elle soit obligatoirement sous l'égide d'un contexte réglementaire, d'autres méthodes alternatives, complémentaires et peu coûteuses pourraient être utilisées en acceptant de perdre tout de même un certain degré de précision. Si cette précision n'est pas le facteur prépondérant et qu'une simple détection avec une certaine tolérance d'erreur est acceptable, l'alternative des capteurs de gaz "low-cost" du commerce semble être une solution envisageable. Créer un sous-réseau complémentaire grâce aux mesures effectuées par des capteurs embarqués sur des smartphones pourrait améliorer la résolution et valider dans la pratique les modèles d'extrapolation.

La modélisation est une abstraction mathématique de la dispersion géographique des gaz polluants dans l'atmosphère. L'ajout d'un maillage plus serré de type bottom-up, créé par les smartphones en grand nombre et mesurant en continu, permettrait une cartogra-

phie plus réaliste et quasi instantanée. Cette cartographie de type crowdsensing pourrait améliorer les modèles de dispersion qui auraient alors des informations supplémentaires leur conférant une granularité plus fine dans leurs estimations. La précision des capteurs de type "low-cost" est un écueil important mais, ces dernières années, ils ont été optimisés pour pallier à ce manque de précision. Cependant, les mesures des smartphones pourraient faire apparaître des tendances à confirmer par des appareillages plus professionnels. Les progrès techniques de la micro-électronique et l'élaboration de matériaux sensibles réagissant sous l'effet d'un gaz sont à l'origine des avancées majeures dans ce domaine. Ces capteurs sont généralement constitués d'une partie physique sensible à l'environnement gazeux. Une modification de cet environnement créera une variation d'un signal électrique aux bornes du capteur. Pour détecter d'infimes variations de gaz, les capteurs doivent être capables d'une certaine sensibilité, fiabilité et sélectivité selon leur usage. Ce sont des paramètres propres importants pour obtenir une évaluation la plus fiable possible.

## 6.2 Typologie des capteurs de gaz et de particules

La définition d'un capteur de gaz est selon l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) : *"Un capteur chimique est un dispositif qui transforme une information chimique, depuis la concentration d'un composant spécifique de l'échantillon à une analyse totale de la composition, en un signal analytique utile. L'information chimique peut provenir d'une réaction chimique de l'analyte ou d'une propriété physique du système étudié"*. Le capteur est un composant dont le fonctionnement est basé sur un phénomène physique, chimique ou biologique permettant de transformer une grandeur physico-chimique en un signal électrique. Il existe ainsi des capteurs non basés sur des réactions chimiques qui sont classés comme capteur physique car ils utilisent des principes de détection basés sur des variations optiques, des variations de masses, de magnétisme ou des variations calorimétriques. Abordons les différents types de capteurs de gaz [68][70].

### 6.2.1 Caractéristiques fondamentales du capteur de gaz

#### Sensibilité

La sensibilité est la capacité à détecter des variations infimes dans les composés gazeux. Cette sensibilité s'étend du ppm au ppb dans notre application.

#### Sélectivité

La sélectivité est la capacité à discerner plusieurs gaz de manière distincte sans avoir un effet de sélection croisée. Cet effet apparaît dans les capteurs de type semi-conducteurs

métal-oxyde qui, selon le type de matériaux semi-conducteurs, ne peuvent faire la distinction d'un gaz particulier mais plutôt d'une famille de composés.

### **Stabilité**

La stabilité est la capacité à déterminer une valeur constante selon une exposition d'un même gaz et d'une même quantité de ce gaz dans l'air. Les capteurs résistifs<sup>1</sup> ont tendance à dériver de leur ligne de référence et ainsi à fausser petit à petit le résultat d'une mesure. Dans ce cas, on parle de dérive de référence (Drift). Cette instabilité s'accroît au fil de l'utilisation des capteurs souffrant de ces dérives.

### **Seuil de détection**

Le seuil de détection représente la valeur minimale qu'un capteur est capable de détecter selon des conditions particulières et à température particulière.

### **Dynamique de détection**

La dynamique de détection représente l'écart d'amplitude des signaux mesurés entre les niveaux de détection minimaux et les niveaux de détection maximaux.

### **Linéarité**

La linéarité représente la propriété de déviation relative entre les valeurs expérimentales mesurées dans un graphe de réponse d'un capteur et sa ligne de réponse de référence calibrée.

### **Résolution**

La résolution est la capacité à distinguer la plus petite différence possible pour un capteur donné.

### **Temps de réponse**

Le temps de réponse est le temps nécessaire pour obtenir une réponse d'un changement de concentration depuis un temps  $t_0$  jusqu'à une certaine valeur de concentration obtenue au temps  $t_1$ .

---

1. La résistivité électrique de ce type de capteur est modifiée en fonction de la quantité de gaz présent dans son élément de détection

**Temps de recouvrement**

Le temps de recouvrement est le temps nécessaire pour qu'un capteur retrouve un état nominal d'initialisation depuis une concentration quelconque non initiale au temps  $t_0$  jusqu'à une valeur initiale retrouvée au temps  $t_1$ .

**Température de fonctionnement**

La température de fonctionnement ou de travail représente la température adéquate et la plus efficiente pour détecter une espèce gazeuse ciblée dans des conditions de sensibilité optimale.

**Hystérésis**

La courbe d'hystérésis représente la plus grande différence entre une valeur de détection maximale et une valeur de détection minimale. Cette propriété représente un effet mémoire que les couches sensibles des semi-conducteurs présentent et qui est causé par les fines couches de molécules de gaz accumulées.

**Cycle de vie**

Le cycle de vie d'un capteur représente la période de temps durant laquelle le capteur va opérer de manière continue. Le cycle de vie typique des capteurs de gaz est de 18 à 24 mois dans des conditions d'utilisations normales.

**6.2.2 Caractéristiques fondamentales du capteur électrochimique**

Les capteurs chimiques sont constitués d'une couche sensible et d'un système de transduction. Le changement d'environnement gazeux modifie les propriétés physiques de cette couche sensible. Ces modifications peuvent se présenter sous la forme d'une variation de conductance ( $\Delta\sigma$ ), d'une variation de masse ( $\Delta m$ ) ou d'une variation de l'intensité lumineuse pour les composants fluorescents ( $\Delta I_{lum}$ ). Le système de transduction va ensuite convertir ces variations de propriété physique en un signal électrique ( $\Delta I$ ), une variation de l'intensité lumineuse émise (fluorescence  $\Delta I_{lum}$ ) ou une variation de fréquence (micro balance à quartz  $\Delta F$ ) [68]. La figure 6.1 suivante illustre ces différents phénomènes.

**Capteur à électrolyte solide**

Ce type de capteur est aussi appelé "conducteur ionique". Le procédé de captation se base sur les transferts de charges électriques entre les espèces gazeuses de l'air et les ions mobiles de l'électrolyte solide séparé par une membrane de conduction qui s'occupe du transport des ions mobiles. Ce déplacement d'ions produit une différence de potentiel entre

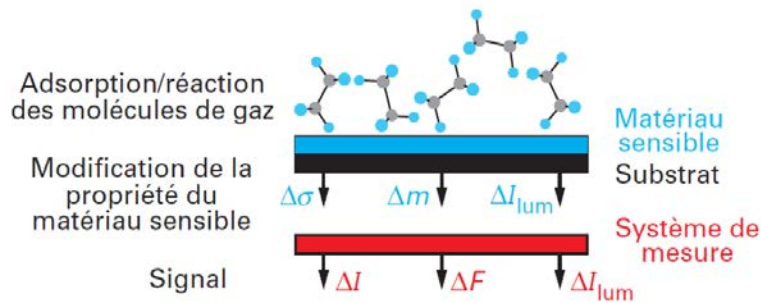


FIGURE 6.1 – Fonctionnement général d'un capteur de gaz [68].

les deux électrodes plongées dans l'électrolyte. Cette différence de potentiel est fonction de la concentration du gaz qui est en contact avec les ions. Ces capteurs peuvent être de type potentiométrique ou ampérométrique. Le type potentiométrique variera en tension en fonction de différents types d'ions de l'électrolyte ( $O^{2-}$ ,  $F^{-}$ ,  $H^{+}$ ,  $Li^{+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $Ag^{+}$ , ...) et le type ampérométrique variera en courant se basant sur les ions  $O^{2-}$ . Les deux types se basent sur la différence entre la pression partielle d'oxygène de référence de l'électrolyte solide et de l'oxygène contenu dans l'air mesuré. Différentes configurations d'ions permettent la détection d'autres gaz que l'oxygène comme le monoxyde de carbone, dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, dioxyde de carbone, hydrocarbures, ... Ces capteurs ont besoin d'un système de chauffage pour augmenter la température de l'électrolyte, typiquement entre 700 et 800 degrés Celsius, ceci afin de permettre un niveau de conduction ionique adéquat et efficient. Les avantages de ce type de capteur sont leurs tailles et leurs possibilités de miniaturisation, leur bonne résistance aux variations thermiques, aux variations de pression et ils ont une variation linéaire en fonction de la concentration d'oxygène. Cependant, leur sensibilité est décrite comme médiocre et ils nécessitent un étalonnage régulier en raison de phénomène de dérive (Drift) arrivant au fur et à mesure de leur exposition aux gaz cibles. Ils ne sont pas conçus pour permettre une mesure en continu. Ce type de capteur n'est dès lors pas adapté à une mesure via smartphones du fait de leur besoin en préchauffage et de leur dérive de résultat de mesure.

### Capteur capacitif

Ce type de capteur est un type de condensateur. Sous l'influence du gaz à mesurer, il voit évoluer ses propriétés diélectriques. Il est composé de deux électrodes métalliques poreuses entre lesquelles se trouve une lame de polymère qui absorbe très facilement l'humidité de l'air. Cette absorption provoque une variation de son volume et ainsi la distance entre les électrodes. La variation de distance se traduit par une variation de capacité. Différents types de capteurs sont utilisés pour détecter des COV (éthanol, toluène, ...). Ces

capteurs présentent quelques avantages qui sont une simplicité de réalisation, une faible consommation d'énergie de polarisation, un temps de réponse rapide et ils sont de petites tailles ce qui pourrait faciliter leur intégration dans une application mobile. Par contre, ce type de capteur est souvent utilisé pour mesurer l'humidité relative de l'air et fonctionne alors comme un hygromètre vu sa propension à absorber les molécules d'eau plus facilement que d'autres gaz. Cela détériore la sélectivité et induit une perte de précision des mesures.

### Capteur résistif et capteur à oxydes semi-conducteurs

Ce type de capteur est aussi appelé capteur à semi-conducteurs métal-oxyde. Les semi-conducteurs ont des propriétés de conductibilité électrique qui sont entre celles des métaux et celles des isolants. Les diodes ou transistors en sont des exemples. Il est possible d'augmenter la conductibilité (ou diminuer la résistivité) du semi-conducteur par un procédé chimique de dopage qui consiste à ajouter des impuretés dans le semi-conducteur. Cela permet de réaliser des semi-conducteurs de type n et de type p, par exemple comme les différentes diodes qui constituent un transistor dit NPN ou PNP. Ce capteur résistif est ainsi caractérisé par une couche sensible basée sur un matériau semi-conducteur typiquement le dioxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  qui permet de détecter le méthane, propane ou monoxyde de carbone. D'autres semi-conducteurs par exemple, le trioxyde de tungstène  $\text{WO}_3$ , permettent de détecter d'autres gaz comme l'ozone ou le dioxyde d'azote ou le CTP  $\text{Cr}_{1.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_3$  (Oxyde de chrome et titane) créé par un procédé chimique de déposition "sol-gel" permettant de détecter l'ammoniaque ( $\text{NH}_3$ ). Un semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite par rapport à un isolant pour que les électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. La figure 6.2 illustre les bandes d'énergie des différents matériaux [37].

Pour un métal, la bande interdite "isolante" n'est pas présente et les électrons s'y déplacent sans difficulté. Dans le cas d'un isolant, l'espace isolant est trop important pour laisser le passage des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Et pour un semi-conducteur, la bande interdite est traversable si un potentiel électrique suffisant est appliqué à ses bornes. Ce phénomène de conduction est très dépendant de la température qui permet de diminuer la résistance de passage à cet effet, la couche sensible est chauffée à une température se situant entre 200 et 400 degrés Celsius. Les gaz cibles sont détectés avec ce type de capteur en se basant sur les échanges d'électrons entre le matériau semi-conducteur polarisé de la couche sensible et des ions  $\text{O}^{2-}$  provenant des molécules  $\text{O}_2$  absorbées à la surface. L'action de chauffer la couche sensible permet de créer les ions  $\text{O}^{2-}$ . Et c'est la variation du taux d'oxygène absorbé à la surface qui change la conductivité du semi-conducteur. L'adjonction de différents dopants (Procédé de déposition Sol-Gel) sur la couche sensible permet différentes réactions d'oxydo-réduction ce qui permet la détection de différentes substances gazeuses. La température de 200 à 400 degrés Celsius ne permet pas seulement d'améliorer la conductivité du semi-conducteur mais permet également de



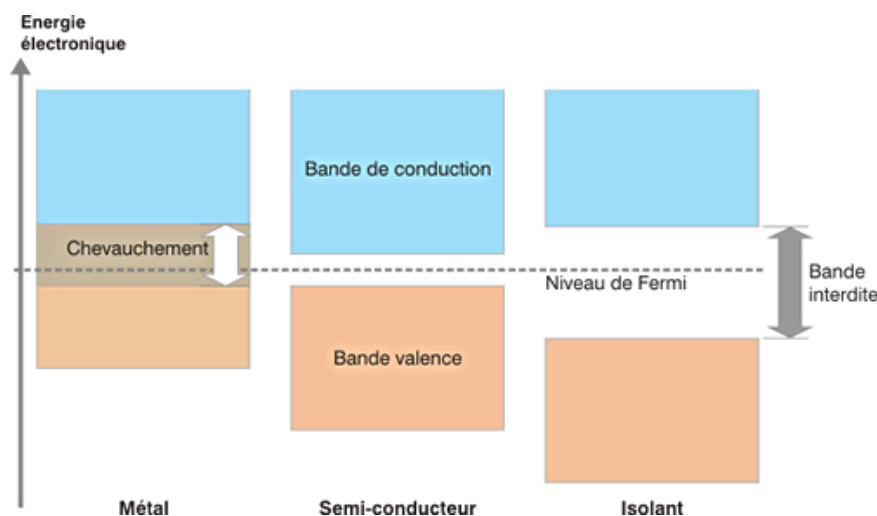


FIGURE 6.2 – Illustration des bandes d'énergie entre métal, semi-conducteur et isolant [68].

cibler plus particulièrement tel ou tel type d'espèce gazeuse. Les avantages de ce type de capteur sont sa facilité de conception, son faible coût, sa faible consommation d'énergie de l'ordre de quelques milliWatts. Ce type de capteur pourrait potentiellement être bien adapté pour des applications mobiles malgré un temps de préchauffage nécessaire pour atteindre les températures adéquates de détection, la couche sensible du semi-conducteur étant directement appliquée sur une résistance chauffante pour l'amener à la température optimale désirée. Cependant, il présente un certain nombre d'inconvénients : sélectivité associée plutôt à une famille de gaz qu'à un gaz en particulier, durée de vie limitée de l'ordre de 18 à 24 mois, une forte dépendance à la température et à l'humidité environnante, des problèmes de dérives de références dus aux phénomènes d'oxydo-réduction d'usure, une non-linéarité dans la réponse face à un même gaz cible causé par un effet de mémoire (hystérésis) et d'accumulation des molécules sur la couche sensible, un temps de recouvrement plus long que le temps de réponse tout en restant de l'ordre de quelques secondes. La figure 6.3 illustre ces phénomènes de temps de réaction. Nous pouvons voir en axe Y, la représentation de la présence ou non d'une substance gazeuse et du temps nécessaire pour détecter le gaz et atteindre un état stable, suivi d'un temps de recouvrement ou effet mémoire pour retrouver la ligne de référence. C'est la valeur de cette ligne de référence qui subit une dérive au fil du temps d'utilisation. Ce type de capteur pourrait être testé dans un futur projet d'expérimentation pour évaluer concrètement son utilisabilité dans un projet d'application mobile de mesure de gaz polluant.

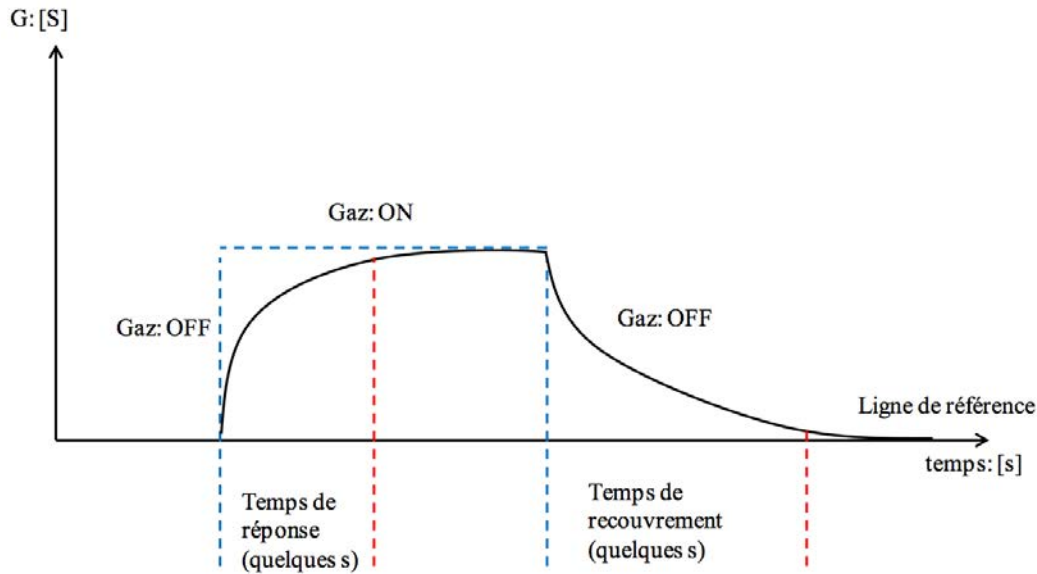


FIGURE 6.3 – Enveloppe des temps de réponse d'un semi-conducteur [68].

### 6.2.3 Caractéristiques fondamentales du capteur à variation de masse

Il s'agit de capteur QCM (Quartz Crystal Microbalance) de type physique se basant sur le principe de micro balance à quartz constituée d'un cristal piezo-électrique intégré à un disque de polymère, qui forme le plateau de la micro balance. Ce capteur est utilisé pour la détection des fractions de particules PM10, PM2.5 et PM1. Dans son état nominal, le cristal oscille à sa fréquence propre. Durant l'exposition au polluant, les molécules interagissent avec le polymère sensible et modifient ainsi sa masse et conjointement sa fréquence. Si la masse augmente, la fréquence diminuera proportionnellement à la masse de polluant déposé. La détection des polluants cibles est fonction de la fréquence résultante après exposition. Ce capteur permet des mesures très précises de la concentration en particules en suspension en connaissant la masse des particules ajoutées pendant un certain temps et en connaissant le débit de prélèvement de l'air. Ce système a l'avantage de pouvoir se répéter rapidement et de pouvoir effectuer des prélèvements en continu. D'autres systèmes similaires fonctionnant comme un microphone à pression peuvent évaluer certains types de polluant selon les principes des fluctuations de pression des ondes acoustiques. Cependant, ce système ne sera pas développé plus précisément du fait de son intolérance aux bruits parasites externes qui faussent les valeurs mesurées.

### 6.2.4 Caractéristiques fondamentales du capteur à variation optique

#### Capteur à infrarouge non dispersif - NDIR

Ce type de capteur [87] utilise le principe d'absorption de lumière infrarouge par les gaz cibles polluants. Il s'agit d'une méthode du type spectroscopie infrarouge. Les gaz peuvent être représentés par leurs différentes longueurs d'ondes qui les caractérisent. Ces différentes bandes de fréquence forment une empreinte caractéristique de chaque type de gaz, exactement comme une identité unique. Par exemple, le  $\text{CO}_2$  a une forte correspondance d'absorption à la longueur d'onde de  $4.26 \mu\text{m}$  qui se trouve être dans le spectre des infrarouges.

Le gaz  $\text{CO}_2$  aura ainsi tendance à absorber une certaine quantité de lumière correspondant à une de ses longueurs d'ondes propres. Dans le cas d'une lumière émettrice de type infrarouge, une étape de filtrage type passe-bande est ajoutée pour enlever les longueurs d'ondes parasites externes. Ce filtre se nomme un interféromètre de Fabry-Perot, il pourra s'accorder selon des bandes de fréquences particulières en fonction du ou des gaz cibles à mesurer. La cellule de détection de lumière résiduelle sera une thermopile dans le cas de l'infrarouge [39]. Celle-ci évaluera la quantité de chaleur réceptionnée en rapport direct avec la quantité connue de lumière émise depuis la source. Ce type de capteur fonctionne par cycle d'émission et de réception. La figure 6.4 illustre ce procédé. Le gaz cible entre dans un espace dans lequel un rayon de lumière infrarouge circule à intervalles réguliers.

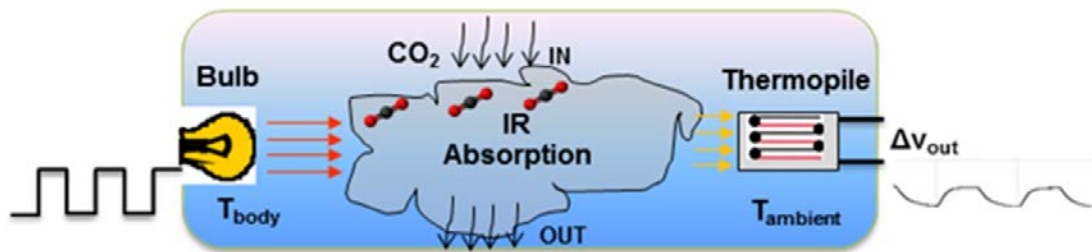


FIGURE 6.4 – Principe de détection NDIR [87].

La lumière infrarouge émise par une LED est modulée en fonction d'un signal d'énergie carré Pulse Width Modulated et d'un cycle utile (Duty Cycle) et le processus d'absorption par le gaz modifiera l'amplitude et l'enveloppe du signal réceptionné par la thermopile. Le différentiel entre le signal d'entrée et le signal modulé de sortie sera une fonction de la concentration du gaz cible. Le phénomène d'absorption suit la loi de Beer-Lambert qui représente la quantité de lumière émise en fonction de la quantité de lumière absorbée et détectée par une cellule adaptée.

Loi de Beer-Lambert :

$$I = I_0 * e^{-kcL}$$

où  $I$  est l'intensité en candela de radiation lumineuse d'infrarouge réceptionnée par la thermopile

$I_0$  est l'intensité en candela de radiation lumineuse d'infrarouge émise au départ

$k$  est une constante d'absorption spécifique pour le gaz cible

$c$  est le rapport de concentration du gaz ciblé exprimé en ppm

$L$  est la longueur du chemin en mètre de la chambre d'absorption de l'émetteur au récepteur

### Capteur photométrique

Ce type de capteur photométrique est adapté pour la détection des matières particulaires PM10 PM2.5 PM1.0. Le principe de photométrie est sensiblement le même que le principe de réflectométrie mais en utilisant des longueurs d'ondes différentes de 780nm à 900nm qui correspondent au spectre de la lumière infrarouge. Ce type de capteur utilise une lumière émettrice modulée qui sera reflétée par les éventuelles particules présentes dans la zone de détection. Ces multiples réflexions formeront une fraction de la lumière émise et elles seront captées par une thermopile dans le cas des infrarouges ou par une cellule photosensible qui traduira à son tour la variation physique en une valeur électrique mesurable. Nous pouvons évaluer l'opacité de l'air se trouvant dans la zone de détection. Le procédé de modulation de signaux d'entrée en forme PWM est nécessaire pour donner des impulsions de lumière, et quelques microsecondes plus tard, après un temps de montée suffisant permettant une mesure fiable, la cellule photosensible mesurera la quantité résiduelle de lumière. Le capteur SHARP GP2Y1010AU0F utilisé dans le chapitre expérimental, fonctionne par le principe de photométrie par infrarouge.

### Capteur Lo Pulse Occupancy time - LPO Time

Cet autre type de capteur fonctionne également sur le principe de réflexion optique de lumière infrarouge mais n'utilise plus de signaux modulés en entrée. Sa spécificité est de permettre le comptage du nombre de dépassement d'un seuil de tension électrique aux bornes de la cellule photosensible. Ces dépassements de tension électrique sont causés par la présence d'une certaine quantité de lumière réfléchi par un certain nombre de particules.

La durée de la période d'évaluation est de l'ordre de la seconde voir plus. Plus le temps est élevé et plus nous aurons une valeur moyenne significative. Pendant cette période de temps, différentes concentrations de particules auront été détectées par la cellule photosensible. Un seuil de détection est mis en place par un filtre passe bande qui limite la visibilité des plus petites crêtes favorisant le comptage des crêtes d'amplitudes supérieures

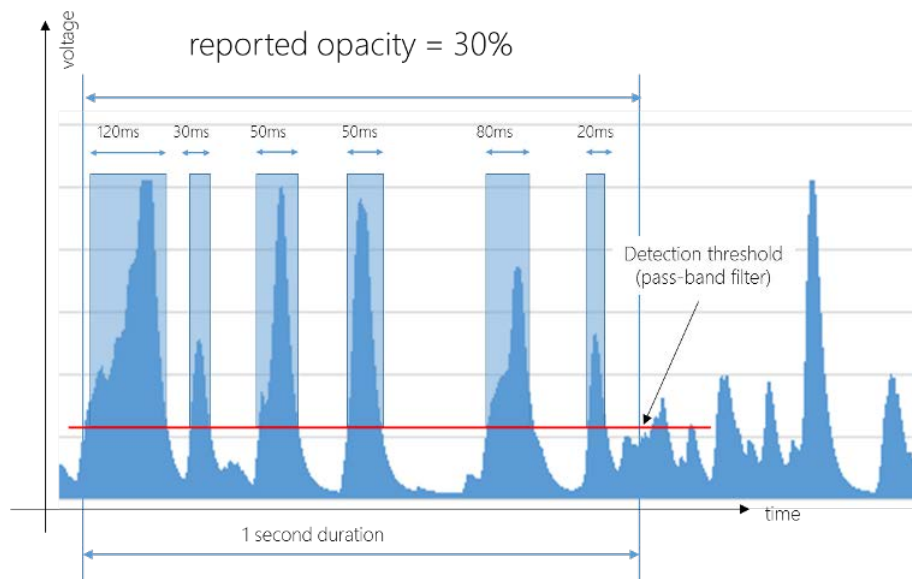


FIGURE 6.5 – Principe de détection LPO [6].

dépassant ce seuil. Dans l'exemple de la figure 6.5, nous pouvons constater au total la somme de 300 ms de temps de dépassement pendant la période de 1000ms. Le résultat de l'opacité de l'air est donc de 30%. Cette valeur est reportée en fonction de la courbe de réponse du capteur pour obtenir une concentration de la masse volumique. Le capteur de particules de la marque Shinyei PPD42NS qui sera également évalué au chapitre d'expérimentation, fonctionne selon ce procédé de comptage de crêtes [6].

### Capteur de lumière diffusée - Light Scattering Pattern Method

Ce dernier type de capteur utilise le principe de diffusion de phénomènes lumineux [92] dans une analyse de type spectroscopique. Le principe de détection de quantité particulaire utilise les phénomènes d'interactions entre la matière et la lumière. Voir la figure 6.6 suivante.

Le principe d'analyse "Light Scattering" de la diffusion de rayons lumineux est l'altération de la direction et intensité d'un rayon de lumière lorsqu'il rencontre un objet ou une particule. Ces altérations sont dues aux effets combinés des réflexions, réfractions, diffractions et absorptions causés par la présence de l'objet [92] sur le chemin lumineux. La figure 6.6 de gauche illustre ces principes. La figure de droite nous montre une représentation des différents phénomènes de diffusion et modifications d'angles d'incidence des rayons lumineux lors de leurs rencontres avec des particules de différentes tailles. Nous

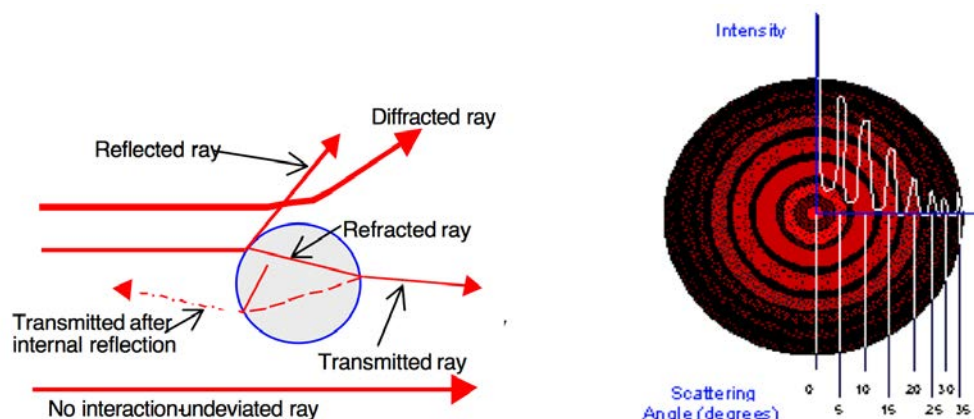


FIGURE 6.6 – Illustrations du principe de diffusion d'un rayon lumineux [92].

pouvons y voir des cercles concentriques de couleurs rouge et noir. Un cercle rouge pour montrer la présence de rayons lumineux et un cercle noir pour l'effet inverse. En effet, les variations d'angles sont proportionnelles à la taille de l'obstacle. Cela aura pour effet de former une empreinte spécifique liée à chaque taille d'obstacle. Le principe du "Light Scattering" utilise les empreintes lumineuses (Scattering Pattern) pour connaître la taille de la particule qui se trouve dans le faisceau lumineux. Ces empreintes sont reconnues par des récepteurs particuliers capables de reconnaître différentes empreintes. Il devient alors possible de déduire les quantités de particules de telles ou telles tailles durant une période de temps donnée. Parenthèse historique : c'est en 1906 que Gustav Mie a formulé une théorie générale de diffusion de la lumière concernant toutes les tailles de particules sphériques dans tout milieu de propagation. Cette théorie peut prédire avec précision l'angle incident résultant et l'intensité résultante d'un rayon lumineux monochromatique diffusé par l'interaction de celui-ci avec un objet particulière de type sphérique dont l'action est isotrope<sup>2</sup>. [92].

Le principe de diffusion de lumière "Light Scattering" peut se formuler :

$$I_{sc} = I_{in}(\theta, \lambda, d, n)$$

Où l'intensité d'une diffusion lumineuse ( $I_{sc}$ ) est fonction de la longueur d'onde  $\lambda$ , de l'angle d'incidence résultant  $\theta$ , de la taille de l'objet particulière  $d$ , et de l'indice relatif de réfraction  $n$  de l'objet. Les rayons lumineux diffusés par les particules de même taille sont parallèles les uns aux autres. Voir la figure 6.7. Sur la figure du haut, nous pouvons voir les différents angles d'incidence des rayons causés par les obstacles dans la zone de

2. Isotrope : comportement uniforme dans chaque orientation.

détection représentée par le rectangle gris. Les différents rayons, ayant le même angle d'incidence, sont parallèles mais cependant leurs destinations sont toutes différentes. Sur la figure du dessous, l'ajout d'une lentille avec une propriété focale particulière modifie les destinations des rayons de même angle d'incidence. Cette modification permet la création des cercles concentriques relatifs aux empreintes de chaque type de taille des particules. Ce dispositif permet la détection d'empreintes particulières par la cellule de détection.

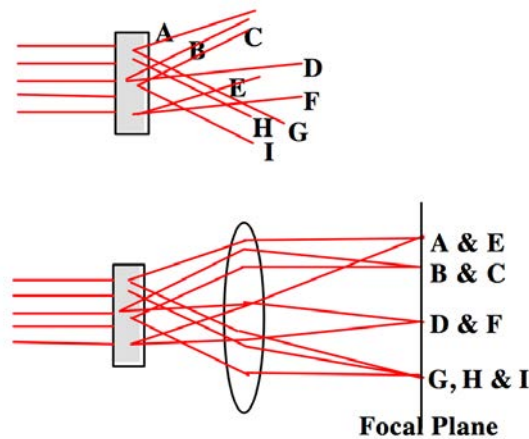


FIGURE 6.7 – Modification optique des angles d'incidences des rayons lumineux pour la cellule de détection [92].

Enfin, la figure 10.13 en annexe, nous offre un récapitulatif des types de capteurs, leurs capacités de détection ainsi que leurs avantages et inconvénients.

---

## Prototypage expérimental

---

### 7.1 Introduction

La réalisation d'un prototypage concret basé sur une application de crowdsensing permettra de vérifier la faisabilité ou non d'une mesure de matière particulaire avec un smartphone. Nous mettrons en place une architecture de type client-serveur. Le client aura pour rôle premier de recueillir les informations de taux de pollution particulaire à un endroit précis. Il devra être capable de disposer, sur une vue cartographique, les différentes données collectées. Il devra formater les informations de pollution dans une structure de données particulière permettant de lier les valeurs mesurées avec leur latitude, longitude et date de mesure. Le client devra également être capable d'envoyer les données collectées et formatées au serveur.

Le serveur aura pour tâche d'accumuler les informations reçues provenant des clients. Il mettra à disposition des utilisateurs différentes pages de consultation des données cartographiques en fonction des types de collection de données sélectionnées par l'utilisateur. Il devra permettre une vue facilitée des différentes valeurs des points (ou marqueurs) géographiques en leur ajoutant une étiquette qui contiendra toutes ses données propres. La représentation géographique des collections de données se fera à l'aide de couleurs particulières liées à l'intensité de chaque donnée recueillie. Ce jeu de couleur sera représentatif du domaine de qualité de la donnée. Une échelle de couleurs dégradées devra nous renseigner visuellement sur les concentrations de particules. Chaque collection de données (RSSI, NOISE, POTHOLE et PM) aura sa propre échelle colorimétrique. Dans le cas de la mesure "PM" nous devons nous aligner sur le code couleur du réseau CELINE pour être capable d'effectuer des comparaisons entre nos mesures et les mesures officielles. Le serveur proposera un système de filtrage des données selon leurs caractéristiques temporelles journalières. Ce filtrage permettra la réalisation d'une vue évolutive des différentes campagnes de collecte.

L'application cliente qui devrait permettre d'atteindre le but de "proof of concept" est "PrismOnBike". Celle-ci a été développée par Mohamed Karmani (Henallux - Promotion 2014) pour la plateforme Android. Comme son nom le mentionne, cette application permet principalement aux cyclistes d'effectuer différents relevés de la qualité de la route empruntée. Cette application utilise différents capteurs classiques et intégrés au smartphone. Il propose également des fonctionnalités comme l'évaluation de la qualité du signal



de réception GSM (RSSI - Received Signal Strength Indication), l'évaluation des intensités sonores via microphone et l'évaluation de la qualité du relief des routes grâce à l'accéléromètre. Ce logiciel client est partiellement fonctionnel en l'état et devra être optimisé pour permettre l'intégration du module de mesure de matière particulaire et l'envoi des données au serveur.

Les capteurs de pollution pour téléphone mobile n'étant pas encore répandus ni intégrés de base au sein des smartphones du commerce, il faudra se tourner vers une intégration d'un module boîtier externe. Celui-ci sera connecté au téléphone hôte par son port USB et sera géré par l'application cliente. Ce dernier pourra ainsi permettre d'effectuer ce type de mesure de pollution. Pour permettre le dialogue entre le smartphone et le module de pollution externe, il sera nécessaire de recourir à une carte d'acquisition intermédiaire compatible avec le système d'exploitation Android.

## 7.2 Carte interface android - IOIO OTG

La platine d'acquisition IOIO a été développée spécialement pour le système d'exploitation Android par le développeur Ytai Ben-Tsvi. La carte IOIO "On The Go" est un appareillage de type micro contrôleur (MCU - Micro Controller Unit). Il met à disposition une grande quantité d'entrées/sorties (46), de niveaux analogiques ou digitaux, il permet l'utilisation d'une grande variété de fonctionnalités et de protocoles répandus comme par exemple la liaison série (UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter), liaison "TWI" (Two Wire interface communément appelée I2C) et bien d'autres fonctionnalités électroniques [1]. Elle permet également la génération de signaux PWM (Pulse Width Modulation). Cette carte permet d'agir comme une interface entre différents types d'entités matérielles électroniques et une machine dite "Host" de type PC ou de type Android. La connexion carte-hardware peut se faire soit via un câble USB ou via une liaison Bluetooth. La carte jouera le rôle d'intermédiaire entre d'un côté, la partie logicielle de contrôle de "PrismOnBike" et de l'autre, le module de mesure de pollution. Cette carte requiert obligatoirement l'ajout d'une librairie [61] au sein du logiciel hôte pour être reconnue et utilisable. Cette librairie impose de redéfinir le type "Activity" des applications Android en "IOIOActivity". Cette redéfinition et héritage de classe obligatoire imposent dès lors l'implémentation de différentes méthodes liées aux concepts et fonctionnements de la carte (Setup() et Loop()). La librairie ajoute un API (Application Programming Interface) Java haut-niveau côté "host" pour manipuler les fonctions d'entrées/sorties, les rendant parties intégrantes ou comme le prolongement du logiciel Android. Ci-après une représentation de la carte IOIO-OTG.

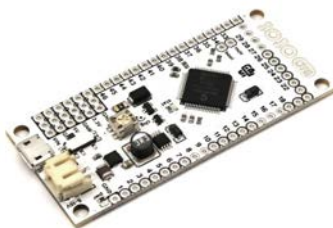


FIGURE 7.1 – Platine d'interface analogique digital - IOIO OTG [1].

### 7.3 Les capteurs particuliers "low-cost"

Durant nos différentes recherches, nous avons trouvé trois capteurs qui ont retenu notre attention. Ils se basent chacun sur une mesure optique de type photométrique en proposant des procédés différents d'évaluation de la pollution particulaire en suspension. Ils sont calibrés en usine et n'ont pas besoin d'être ré-étalonnés au fur et à mesure du temps d'utilisation comme c'est le cas des capteurs chimiques. Les capteurs se basant sur de la mesure optique sont une alternative stable face aux capteurs chimiques. Il est cependant intéressant de noter que les sources de lumière de référence, comme la lumière blanche de matériel de laboratoire, ont aussi un certain besoin de maintenance et de vérification de la continuité de leur couverture spectrale. Les LED sont adaptées à ce type de besoin étant donné que la couleur d'une LED est liée à la longueur d'onde déterminée par la distance entre l'anode et la cathode. Selon les fiches constructeurs, les trois capteurs que nous allons tester permettent de détecter au minimum les particules de taille inférieure à  $10\text{ }\mu\text{m}$  qui sont la taille des poussières et de la fumée de cigarette ou encore du pollen. Ce seuil est en réalité un pré-requis très important et doit être considéré comme une spécificité de base à respecter. Un seuil de détection plus bas permettant d'atteindre les tailles de  $2.5\text{ }\mu\text{m}$  ou  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  semble être très important pour détecter les particules les plus nocives pour la santé humaine, les bactéries et autres corpuscules. Les capteurs ne permettant pas de mesurer des valeurs plus basses que  $10\text{ }\mu\text{m}$  n'auront pas grand intérêt et seront écartés du prototype.

Les capteurs que nous allons tester ont tous un coût d'achat faible en-dessous des cinquante euros. Cet aspect financier est primordial dans la création d'une communauté active de "crowdworkers". Ceux-ci auront la possibilité de réaliser leur module externe à un coût le plus faible possible.

Nos premières constatations concernant les capteurs choisis nous rappellent les contraintes

inhérentes aux applications mobiles qui sont : une consommation énergétique la plus faible possible et une taille la plus petite possible. Ces contraintes devront faire l'objet d'une étude ultérieure dans une optique de développement optimisé. Nous tenterons de respecter au maximum ces contraintes de base durant l'élaboration du prototype.

La mesure particulaire est très sensible aux changements d'humidité relative de l'air ambiant. Si celle-ci augmente, la masse des particules augmenteront aussi ce qui faussera la véracité de la détection de telle ou telle taille de particule. Les plus petites particules apparaîtront comme ayant une taille plus importante et seront considérées comme des particules de plus grandes tailles. Dans de futures recherches, un capteur d'humidité pourrait être intégré pour corriger les effets néfastes de l'humidité.

Les trois capteurs décrits ne sont pas les seuls sur le marché. Il existe plusieurs autres capteurs similaires dans le commerce mais ayant malheureusement un coût plus élevé, par exemple, le capteur Labco DP-100 [15] ou le système complet Dylos DC1100 [34]. Le capteur Labco DP-100 entre dans une gamme supérieure car il requiert un système connexe de gestion de flux d'air entrant/sortant, ce qui l'écarte des catégories "low-cost" et peu énergivores requises pour notre projet. Il pourrait cependant faire l'objet de futures recherches plus approfondies dans ce domaine. Le capteur Dylos DC1100 est, quant à lui, un système complet autonome de mesure de la pollution particulaire, il utilise le principe du "Light Scattering". Il pourra servir de référentiel pour des comparaisons également dans de futures recherches. L'objectif du prototype de système de crowdsensing que nous allons réaliser se rapproche du concept du capteur Dylos. Au lieu d'être un système autonome nous l'intégrerons au travers de l'application Android. Pour prendre un dernier exemple, la société SKC [55] propose ce qu'on appelle les PEM, c'est à dire les "Personal Environmental Monitor". Voir la figure suivante 7.2. Ce type d'appareillage fonctionne à l'aide d'une petite pompe s'y connectant permettant la création d'un flux d'air régulier. Différents modèles permettent de détecter les particules PM10 en aspirant 4 litres d'air par minute ou les particules PM2.5 en aspirant 10 litres par minute. Il existe également la tendance du "wearable" qui intègre des composants et détecteurs électroniques dans des vêtements, voir le projet "AirCasting" [3]. Ceux-ci réagissent à l'air ambiant en fonction de la concentration de polluant en changeant de couleur ou en utilisant d'autres stratégies d'avertissements.

Cet appareillage relativement petit pourrait être intéressant dans la fabrication de sondes miniatures apposées régulièrement à différents endroits pour créer un système de maille statique plus serré que les réseaux télémétriques. Ce type de réseau de mesure serait sensiblement moins cher face aux matériels professionnels mais cette fois encore, dans l'approche d'un module externe peu énergivore associé à un smartphone, l'adjonction d'une pompe supplémentaire complique et dénature le côté mobile. De plus, la pompe ferait un certain bruit et consommerait une quantité d'énergie non négligeable pour pomper les 10



FIGURE 7.2 – Personal Environmental Monitor [55].

litres nécessaires permettant l'analyse.

### 7.3.1 Sharp GP2Y1010AU0F

Ce premier capteur de particules est fabriqué par la société Sharp, il s'agit du modèle GP2Y1010AU0F [25]. Son coût d'achat est d'environ dix euros et sa calibration est effectuée en usine. La fiche technique nous indique que le capteur est capable de détecter les poussières et la fumée de cigarette. Aucune autre indication précise concernant la détection de la taille minimale de particule n'est mentionnée. Ces seules informations nous permettent seulement de supposer que le capteur est capable de détecter des particules de tailles allant de PM1.0 à PM10 grâce au schéma de la figure 10.14 page 115. Ce manque d'information de base est un inconvénient pour ce type de capteur. Initialement il est conçu pour être intégré aux systèmes d'air conditionné.

Son principe de fonctionnement est la photométrie en utilisant un principe de réflexion de la lumière infrarouge causée par les particules en suspension dans la zone de détection. L'utilisation de la lumière infrarouge permet de le rendre insensible aux variations des sources lumineuses externes et visibles. Il est constitué d'une LED infrarouge et d'une cellule photo sensible. Celles-ci sont disposées pour former une zone de croisement ou de réflexion entre les chemins du faisceau de lumière généré et de la cellule photosensible, voir la figure 7.3 ci-dessous. La présence ou non de particules dans cette zone commune créera différentes réflexions de lumière infrarouge vers la cellule photosensible.

Ces réflexions infrarouges créeront de faibles signaux électriques aux bornes de la cellule photosensible. Ces signaux seront amplifiés pour correspondre à la quantité de particules présentes dans la zone de détection de particules. La correspondance entre les signaux électriques aux bornes du capteur et la quantité de particules est expliquée par la figure 7.4.

Nous pouvons constater que le capteur réagit presque de façon linéaire entre un peu plus de 1V et 3.5V pour représenter une quantité de particules allant de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à

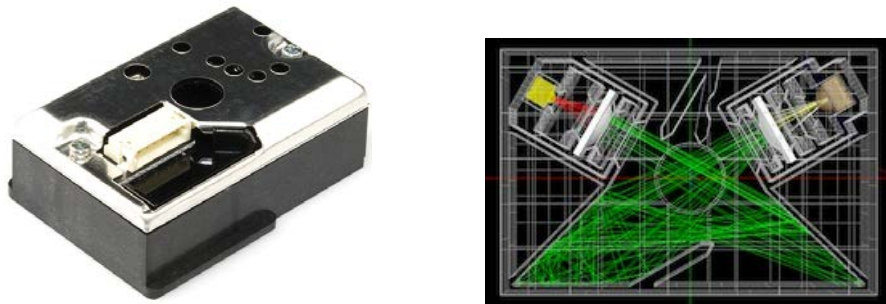


FIGURE 7.3 – Sharp GP2Y1010AU0F [25] et ses faisceaux lumineux internes [52].

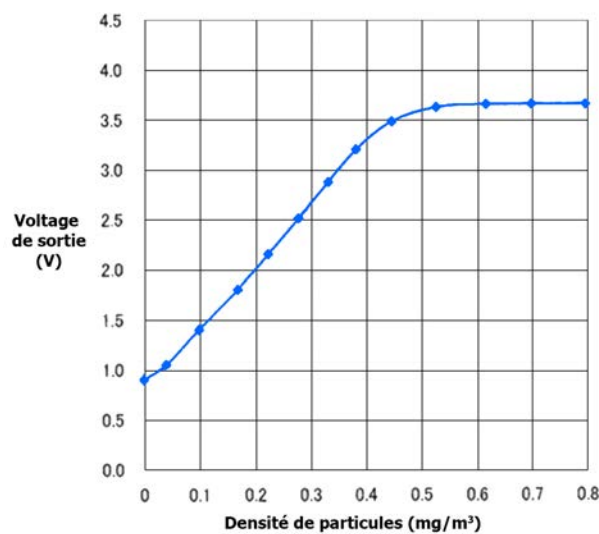


FIGURE 7.4 – Correspondance voltage-concentration du capteur Sharp [25].

500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pour son bon fonctionnement, ce capteur requiert quelques composants électroniques supplémentaires comme un MCU générateur de signaux PWM, une résistance de 150  $\Omega$  et une capacité de 220  $\mu\text{F}$ . La figure suivante 7.5 nous fournit une représentation physique de la connexion typique du capteur avec un micro contrôleur.

Nous mettrons en œuvre ce circuit dans la réalisation de notre prototype. A la figure 7.6, nous pouvons voir que ce capteur a besoin en entrée d'un signal carré modulé (PWM). Une onde carrée est une oscillation entre deux états électriques stables à une fréquence donnée. La génération de ce signal doit être effectuée très précisément, de l'ordre de la microseconde et avec un rapport cyclique [21] de 3.2%. Le rapport cyclique d'un phénomène périodique comme une onde carrée exprime le rapport entre la durée du phénomène à un certain niveau électrique, dans notre cas +5V, et la durée totale de la période de

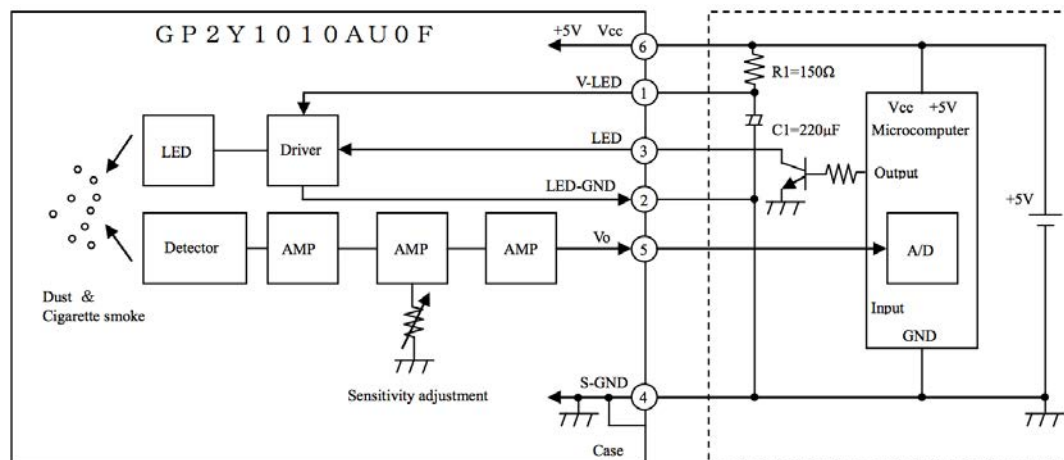


FIGURE 7.5 – Schéma de connexion du capteur Sharp [25].

temps. Dans 96.8% du temps restant nous aurons ainsi un niveau électrique de 0V. La période totale aura une durée de 10 millisecondes.

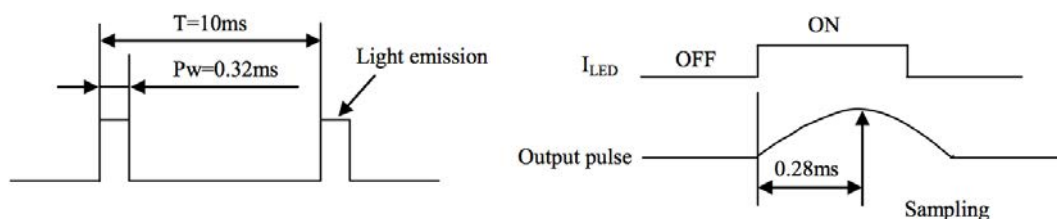


FIGURE 7.6 – PWM du capteur Sharp [25].

La réalisation de cette onde carrée nécessaire est la suivante : la forme d'onde carrée aura un niveau élevé de +5V pendant une durée de 320  $\mu$ s. Durant ce temps, la LED émettrice infrarouge génèrera un faisceau lumineux qui sera éteint aux termes des 320  $\mu$ s. La cellule photosensible atteindra un niveau électrique suffisant pour permettre la mesure significative à partir de 280  $\mu$ s. C'est à ce moment précis qu'il faudra relever le niveau électrique analogique aux bornes du capteur. Une certaine tolérance est néanmoins acceptée pour la précision du temps de relevé. La fiche technique [25] nous informe d'une tolérance de  $\pm 20$   $\mu$ s. La différence de potentiel électrique, relevée 40 microsecondes avant l'extinction de la LED, nous permettra de connaître la quantité de particules présentes dans la zone de détection. Ce capteur n'utilise pas de système de gestion de flux d'air au travers de sa zone de détection. Le seul mouvement de l'air environnant est utilisé pour faire circuler les particules au sein du capteur.

### 7.3.2 Shinyei PPD42NS

Ce deuxième capteur de particules provient de la société Shinyei. Il s'agit du modèle PPD42NS [54]. Son prix est de moins de 20 euros. Il existe un capteur similaire commercialisé par son concurrent direct, la société coréenne Samyoung avec son capteur DSM501B.



FIGURE 7.7 – Shinyei PPD42NS et une représentation de la zone de détection [29].

Ce capteur utilise également la photométrie de réflexion infrarouge comme principe de fonctionnement couplée à la méthode LPO Time (Low Pulse Occupancy Time). Ce type de méthode entraîne l'élaboration d'une mesure moyenne sur une durée plus grande, typiquement une trentaine de secondes. Sa conception physique est quasi identique au capteur Sharp concernant le croisement entre le faisceau infrarouge et la cellule photosensible. Le système de détection est également calibré en usine. Ce capteur possède en plus une résistance chauffante de 5 Watts qui va permettre la convection d'un flux d'air continu aspirant les particules environnantes. Ce dispositif devra obligatoirement être utilisé verticalement. Sous l'action de cette aspiration les particules vont pénétrer dans la zone de détection et vont réfléchir une certaine fraction de lumière infrarouge émise. Ces réflexions auront pour effet de générer une tension aux bornes de la cellule photosensible. Au contraire de la mesure quasi instantanée du capteur Sharp et de la tension proportionnelle à la présence des particules, le capteur Shinyei va continuellement basculer sa sortie digitale d'un signal haut +5V vers un signal bas 0V en fonction du nombre de dépassements du seuil de détection de particules. Le nombre de bascules électriques (LPO Time) sera proportionnel à la présence de particules dans la zone de détection. Le couplage de ce capteur à un microcontrôleur est nécessaire pour compter le nombre de bascules vers le seuil électrique bas 0V. Voir la représentation du dépassement de seuil sur la figure 6.5. Un document relatant la rétro-ingénierie de ce capteur est disponible au document [29]. Ce capteur est capable de détecter des particules de taille de PM1.0 et la figure 7.8, nous permet de voir sa courbe de réponse.

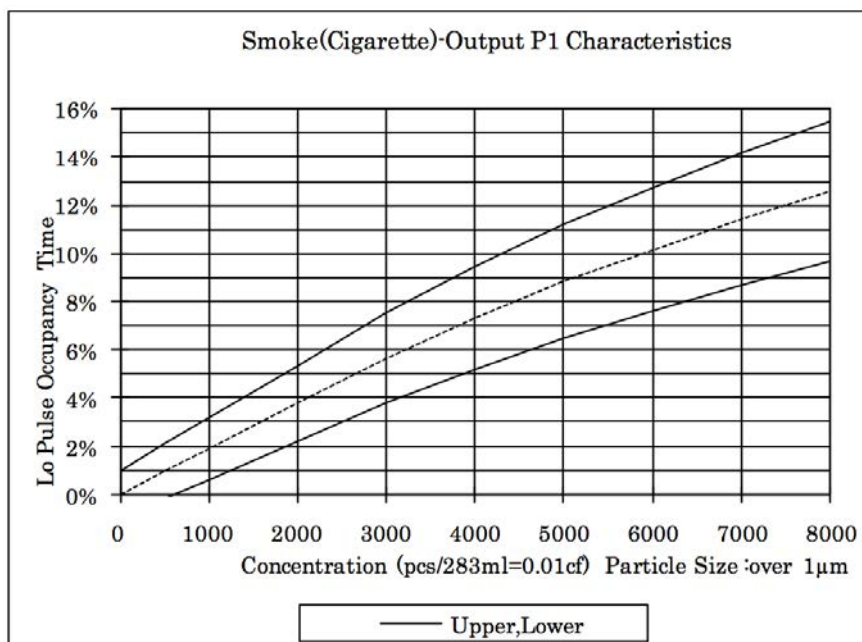


FIGURE 7.8 – Correspondance ratio-concentration du capteur Shinyei [54].

Le nombre LPO Time permet le calcul d'une valeur en pourcentage (ratio) du temps total de dépassement de seuil durant la période d'évaluation, soit les valeurs en-dessous de 0,7V. Avec la correspondance de cette courbe, il est alors possible de connaître la concentration particulaire en "cubic feet" ( $\text{ft}^3$ ).  $0.01\text{ft}^3$  représente environ 283 millilitres de volume d'air. Ce capteur est ainsi capable de nous fournir la concentration de particules de plus de  $1 \mu\text{g}/\text{ft}^3$  dans ce volume d'air par période d'analyse.

Pour obtenir un résultat qui sera comparable entre les capteurs, nous devons convertir la concentration  $\mu\text{g}/\text{ft}^3$  obtenue en concentration  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nous sommes obligés de faire quelques hypothèses concernant la masse des particules car il est certain que plusieurs sortes de particules seront présentes à un instant donné et selon des tailles et densités différentes. Ainsi nous prenons les hypothèses suivantes :

- Toutes les particules sont sphériques avec une densité moyenne de  $1.65\text{E}12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Le rayon des particules plus petites que  $2.5 \mu\text{m}$  est de  $0.44 \mu\text{m}$ .
- Le rayon des particules plus grandes que  $2.5 \mu\text{m}$  est de  $2.6 \mu\text{m}$ .

La formule suivante nous permet alors d'effectuer cette conversion [83][81].



$$\text{Concentration en } \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{n}{0.0238} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot \rho$$

où  $n$  est la concentration en  $\mu\text{g}/\text{ft}^3$ .

$r$  est le rayon de la sphère particulaire en  $\mu\text{m}$ .

$\rho$  est la densité des particules en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 7.3.3 DFRobot SEN0177

Ce dernier capteur utilise les caractéristiques optiques de diffusion de lumière infrarouge. Il est capable de déterminer avec précision la quantité de particules présentes dans un volume d'air. Il compte littéralement le nombre de particules présentes en fonction de leur taille grâce à un rayon lumineux de type LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Ce capteur utilise le principe de diffusion de rayons lumineux monochromatiques par la méthode dite de "Light Scattering" [27]. Il est créé et distribué par la société DFRobot [33]. Son coût d'achat est de moins de cinquante euros. Le capteur est livré avec une carte électronique secondaire qui permet de faire l'interface de type série avec son contrôleur MCU. Dès la mise sous tension de ce dispositif, le capteur émet des données par le connecteur "tx" voir la figure 7.9.



FIGURE 7.9 – Capteur DFRobot SEN0177 et son module de communication uart [27].

La taille minimale détectée est de  $0.3 \mu\text{m}$ . Avec l'aide de son module de communication UART (Communication Série RS-232), ce capteur nous fournit à intervalles réguliers un tableau de valeurs entières contenant les 3 valeurs suivantes, PM10, PM2.5 et PM1.0 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ce tableau se trouve à la section "Communication protocol". Ce capteur est doté d'un système de ventilation pour forcer le passage des particules dans la zone de détection. Cette ventilation est obligatoire pour que la méthode de "Light Scattering" soit la plus efficace possible. En effet, le flux d'air crée un brassage régulier des particules évitant ainsi les phénomènes de gravitation sédimentaire des particules. Sans ce mélange, les particules de petites tailles seraient détectées en surnombre. Un brassage forcé permet une meilleure répartition des espaces inter-particulaires [27].

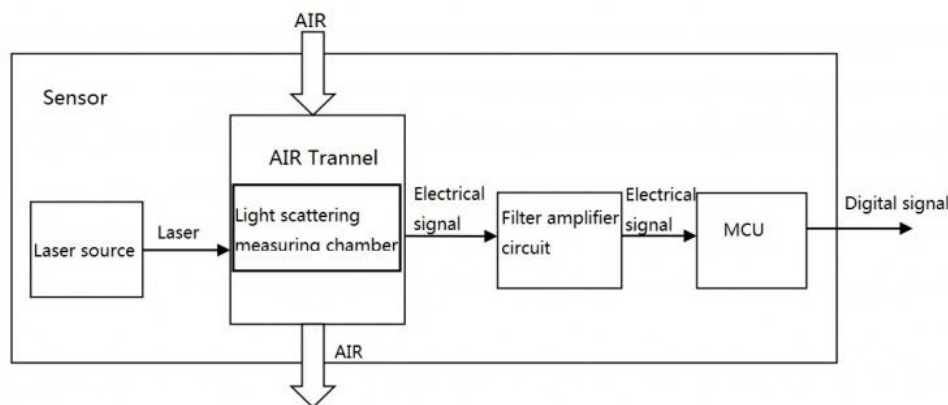


FIGURE 7.10 – Structure interne du capteur DFRobot SEN0177 [27].

La figure 7.10 nous permet de visualiser la structure interne du capteur SEN0177. Nous pouvons voir les différents composants de ce dispositif ainsi que le flux d'air pénétrant dans la chambre de détection. Il existe plusieurs autres modèles similaires de capteurs. Par exemple, le capteur PM100 ou SDS018 de NovaFitness [12].

## 7.4 Elaboration du prototype

### 7.4.1 Diagramme des composants

Notre système d'information utilisera une architecture classique client-serveur. La figure 7.11 illustre cette architecture. L'application "PrismOnBike" du smartphone communique de 2 façons distinctes. La première interface utilise le protocole USB, au travers d'appels systèmes gérés par Android, pour communiquer avec la carte externe IOIO. Cette carte est reliée au capteur de particules par son interface UART. Les instructions du programme "PrismOnBike" effectuent une lecture régulière du port série entrant "rx" (receive) de la carte IOIO. Ce port "rx" est régulièrement alimenté par le port "tx" (transmit) du capteur de particules. La deuxième interface de l'application "PrismOnBike" utilise le protocole HTTP pour envoyer les données collectées au serveur central. Ce serveur central est un conteneur de servlet (Apache Tomcat v7.0). Un thread particulier "UploadServlet" attend une connexion provenant d'un client "PrismOnBike". Dès la réception de données, la servlet effectue différentes tâches de vérification et ajoute les nouvelles données aux fichiers conteneurs "datasets". Le serveur permet alors la visualisation de ces données au travers d'une autre interface HTTP réservée aux différents navigateurs web clients qui souhaiteront s'y connecter.

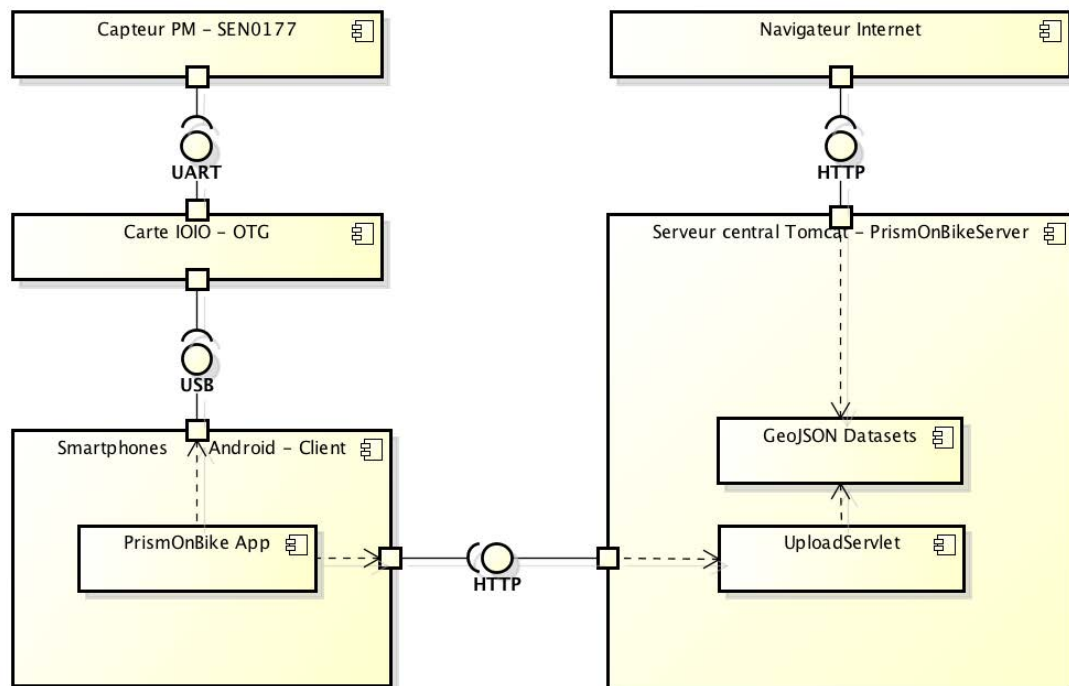


FIGURE 7.11 – Diagramme des composants de l'architecture.

### 7.4.2 Modifications de l'application "PrismOnBike"

Nous avons commencé par modifier l'application "PrismOnBike" pour qu'elle puisse utiliser correctement la carte d'acquisition IOIO-OTG et pour qu'elle puisse être capable de gérer la mesure de pollution particulaire. L'élaboration de l'applicatif serveur se trouve en page 85.

Le logiciel "PrismOnBike" est une application Android fonctionnelle. Nous avons eu quelques difficultés lors de la prise en main et mise en place du projet dans l'application de développement "Android Studio" concernant le niveau API de développement. Nous avons procédé à quelques modifications dans le but de pouvoir utiliser notre module externe et d'améliorer l'utilisation globale de l'application.

Nous avons modifié la séquence de démarrage de l'application pour qu'elle autorise l'usage de la carte IOIO. Le "splashscreen" initial causait un défaut de démarrage de l'application. En effet, dans le monde "Android", il existe un fichier particulier qui se nomme "AndroidManifest.xml". Le contenu de ce fichier renseigne les caractéristiques de structuration des activités et les pré-requis pour le bon fonctionnement de l'application. Une définition d'activité se trouve en exemple ci-après. Une activité peut-être considérée

comme une vue utilisateur. Et il est obligatoire de renseigner une activité de départ qui servira de point d'entrée de l'appliquatif. Durant le branchement USB de la carte IOIO, le système d'exploitation Android recherche la meilleure application susceptible de fonctionner avec cette carte en utilisant le protocole de communication "Open Accessory" [26] (lignes 14 à 26). En laissant, le "splashscreen" comme point d'entrée de l'application, nous avons soit une boucle de démarrage causant l'échec de l'application soit aucune détection de la carte IOIO. Cette page d'introduction a ainsi été déplacée sous la section "About us" de l'écran principal et nous avons déclaré notre activité principale comme étant le point d'entrée de l'application (lignes 9 à 12).

```

1  <activity
2      android:name=".MapViewActivity"
3      android:configChanges="keyboardHidden|orientation|screenSize|layoutDirection"
4      android:label="@string/app_name"
5      android:launchMode="singleTask"
6      android:screenOrientation="portrait"
7      android:theme="@android:style/Theme.Holo.Light.DarkActionBar" >
8
9      <intent-filter>
10         <action android:name="android.intent.action.MAIN" />
11         <category android:name="android.intent.category.LAUNCHER" />
12     </intent-filter>
13
14     <intent-filter>
15         <action android:name="android.hardware.usb.action.USB_ACCESSORY_ATTACHED" />
16     </intent-filter>
17
18     <intent-filter>
19         <action android:name="android.hardware.usb.action.USB_DEVICE_ATTACHED" />
20     </intent-filter>
21
22     <meta-data android:name="android.hardware.usb.action.USB_ACCESSORY_ATTACHED"
23         android:resource="@xml/accessory_filter" />
24
25     <meta-data android:name="android.hardware.usb.action.USB_DEVICE_ATTACHED"
26         android:resource="@xml/device_filter" />
27 </activity>

```

Pour corriger la détection de la carte externe, nous avons également modifié la hiérarchie des supertypes de l'activité principale "MapViewActivity" en lui faisant hériter du supertype "MapView". Celui-ci hérite à son tour de la classe "IOIOActiviy" nécessaire pour l'adjonction de la carte IOIO externe. En procédant de cette manière, nous avons pu recentrer toute l'intelligence de l'application ainsi que la classe d'utilisation de la carte IOIO dans une seule classe d'utilisation générale "MapViewActivity". Ces transformations ont également permis de factoriser quelques classes et méthodes redondantes favorisant ainsi une facilité de codage et de maintenance.

L'application permet d'afficher différents services de cartographie à savoir "MapQuest" en ligne, "Mapnik" en ligne et une version de carte "Offline" se basant sur le fichier "belgium.map" présent dans la mémoire interne du smartphone. La mémoire interne du système Android ne doit pas être confondue avec la carte SD externe car il s'agit de deux

points de montage différents. Le chargement du fichier "belgium.map" a été fastidieux avec une confusion initiale de ces deux espaces mémoire différents. A titre d'ergonomie, nous avons ainsi rajouté la possibilité de parcourir le système de fichier de façon automatique ou manuelle pour importer un fichier "offline" adéquat dans l'utilisation du service de cartographie "offline".

Une autre fonctionnalité a été rajoutée permettant de terminer l'application autrement qu'en utilisant de multiples pressions sur le bouton retour "back button". En effet, lors de la fin de l'utilisation de "PrismOnBike" et lors de l'appui sur le bouton de retour, nous étions obligatoirement menés vers la méthode "PostData()" qui tentait de se connecter à un serveur inexistant. En enlevant ce chemin de sortie forcée par l'usage de cette méthode, nous avons dû rajouter une entrée dans le menu de l'application permettant de lancer manuellement l'envoi des données vers le serveur central. En procédant de cette manière, nous sommes maintenant capables de terminer l'application sans être obligés d'envoyer les données recueillies et nous pouvons décider quand envoyer ces données.

L'application "PrismOnBike" utilisait parallèlement deux systèmes de stockage des données. Les données étaient enregistrées dans une base de données Sqlite et dans des fichiers de type "plain text". Nous avons modifié ce double emploi ; maintenant durant le cycle d'usage de l'application, Sqlite est utilisé pour stocker toutes les données en cours d'utilisation et ce n'est que lors de l'envoi vers le serveur central que nous créons les fichiers conteneurs à la volée, avant de les envoyer.

### 7.4.3 Constatations techniques

Le projet de prototypage initial consistait en l'intégration de tous les capteurs à la carte externe IOIO pour une comparaison aisée entre les différents capteurs "low-cost". Mais après plusieurs tentatives infructueuses d'intégration des capteurs Sharp et Shinyei à cette carte, nous avons pris conscience d'un problème majeur. Cette carte d'acquisition ne peut seulement être vue que comme le prolongement du programme Android. En effet, la gestion de la carte est régie par le programme "PrismOnBike" pour les définitions et implémentations des méthodes d'usage. Mais elle est aussi implicitement contrôlée par le système d'exploitation sous-jacent. Ce dernier contient son ordonnanceur de processus qui a le rôle de distribuer et de partager le temps d'accès au processeur pour effectuer les différentes tâches des processus en cours et ce, selon différentes stratégies de gestion de ressources. Cette perte de contrôle de la carte IOIO au sein du programme "PrismOnBike" impose une certaine tolérance dans l'exécution temporelle des différents threads associés à cette carte.

Or, le capteur Sharp impose la génération de signaux PWM de grande précision pour qu'il puisse fournir des valeurs électriques cohérentes à un moment donné. Le capteur Shi-

nyei requiert lui aussi un module particulier qui permettra le comptage des dépassements de crêtes et ce de manière temporellement précise. L'ordonnancement des processus effectué par Android causerait également la perte de quelques cycles de dépassement, ce qui pourrait fausser la valeur du taux de particules. Il existe sans doute des solutions pour pallier à ce genre de problème. Nous avons pris la décision de ne pas utiliser ces deux capteurs avec la carte IOIO. Nous trouverons une solution adéquate lors de recherches ultérieures.

Suite à cela et afin de pouvoir effectuer tout de même quelques expériences de comparaison, nous avons utilisé un système de micro-contrôleur Arduino Uno R3 qui permet de gérer convenablement ces deux capteurs particuliers. Celui-ci permet la génération de signaux PWM et propose également l'utilisation de la fonction "PulseIn" nécessaire pour le capteur Shinyei. Le code source en annexe 10.1 page 96 a été téléchargé dans la mémoire du micro-contrôleur Arduino.

#### 7.4.4 Implémentation du micro-contrôleur Arduino

La structuration du code de l'Arduino est répartie entre deux méthodes particulières "setup()" et "loop()". La carte IOIO suit également cette structure. Dans la méthode "setup()" nous déclarons les numéros des ports I/O utilisés en tant que entrée ou sortie, lignes 23-24. Les variables partagées sont généralement déclarées dans le scope global de l'application. La méthode "loop()" est continuellement répétée après que la méthode "setup()" ait été exécutée. Dans cette grande boucle générale, nous avons intégré les deux algorithmes nécessaires aux fonctionnements des capteurs Sharp et Shinyei. Nous effectuons une sélection permettant de lancer l'un ou l'autre algorithme.

La branche "then", ligne 33, contient l'algorithme du capteur Sharp. Nous pouvons voir que nous allumons la LED émettrice à la ligne 35. Ensuite nous attendons un certain laps de temps, ligne 36, normalement 280  $\mu$ s, mais en réalité nous avons dû modifier cette valeur pour générer effectivement le signal carré attendu. Cette valeur a été modifiée à 175  $\mu$ s. Après cette attente, nous relevons la tension électrique aux bornes du capteur en évaluant l'entrée analogique "0", ligne 37. Ensuite, nous attendons encore pendant un certain temps de repos de 40  $\mu$ s, ligne 38. Cette valeur a aussi été modifiée à 25  $\mu$ s pour fournir le rapport cyclique attendu de 3.2%. Ensuite nous attendons encore 9680  $\mu$ s pour former la période de 10 ms. Nous avons utilisé un oscilloscope pour vérifier la génération parfaite du signal carre PWM et son rapport cyclique de 3,2%. La figure 7.12 nous permet de constater en axe X que la durée totale du niveau électrique haut correspond bien à 320  $\mu$ s et en axe Y que la différence de potentiel est bien de 4,74 V.

A la ligne 42, nous effectuons la transposition de la valeur analogique brute mesurée en un des niveaux de résolution. L'entrée analogique a une résolution d'évaluation de

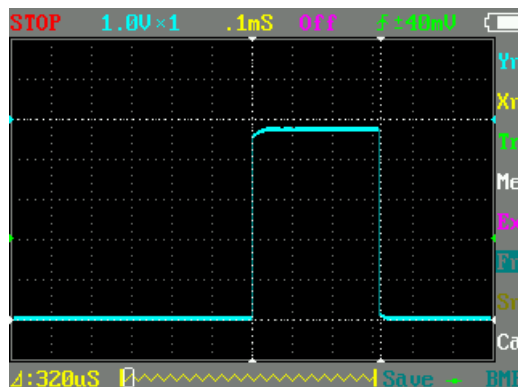


FIGURE 7.12 – Vue oscilloscope du signal PWM généré.

$2^{10}$  bits soit 1024 niveaux différents. La tension d'alimentation est de 4,74 Vcc. A chaque niveau de résolution possible correspond une différence de potentiel de  $4,74 / 1024 = 4,62$  milliVolts. La ligne 43 nous permet de faire correspondre la tension calculée "calc-Voltage" avec la courbe de correspondance de concentration particulaire. Cette équation linéaire a été établie par Monsieur Chris Nafis [63]. La valeur obtenue est une approximation de la valeur réelle. Avec cet algorithme, nous obtenons une mesure chaque seconde.

La branche "else", ligne 57, contient l'algorithme du capteur Shinyei. Cet algorithme consiste en une boucle "while" répétée jusqu'au terme de la période d'évaluation "sampletime\_ms". A chaque itération, la fonction "pulseIn(...)" ligne 62, permet de compter le nombre de bascules de niveaux électriques du niveau haut +5V vers le niveau bas de 0,7V. Nous testons si la fenêtre de temps d'évaluation est achevée à la ligne 64. Si c'est le cas, nous pouvons calculer, ligne 66, le pourcentage de temps où les crêtes de tensions ont dépassé le seuil de détection particulaire. Ensuite, à la ligne 69, nous effectuons le calcul de l'approximation de la concentration de pollution [63].

Cependant, la valeur obtenue est une concentration en  $\text{ft}^3$  ou cubic feet. Ceci nous impose de la convertir pour qu'elle soit exprimée en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , voir la formule 7.3.2 page 70. L'équation des lignes 72-73 provient du document [81].

Ces multiples approximations ne font que rendre les valeurs finales encore plus incertaines. Nous verrons, dans nos différents essais, section 8.2 page 88, si ces approximations ne sont pas trop destructrices. La figure 7.14 à la page 79 nous permet de voir le schéma électronique du prototype Arduino couplé aux capteurs Sharp et Shinyei. La figure suivante 7.13 nous montre la réalisation concrète du prototype Arduino.

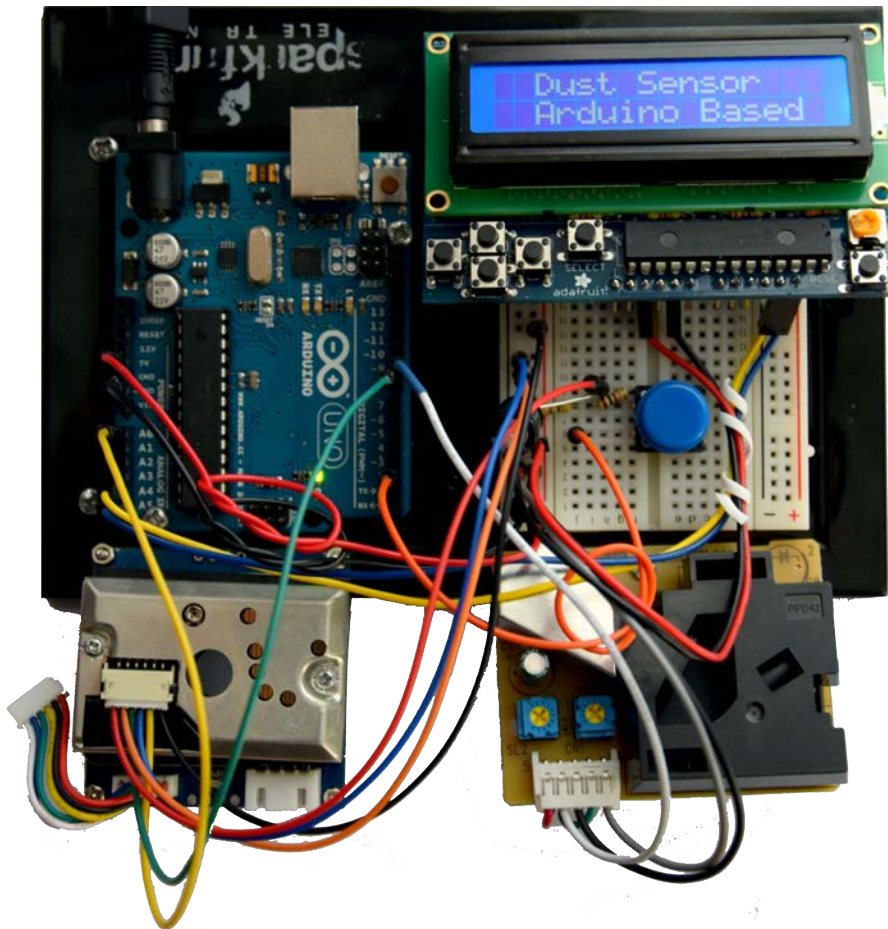


FIGURE 7.13 – Platine d'expérimentation arduino avec les modules Sharp et Shinyei.



### 7.4.5 Schéma du prototype Arduino

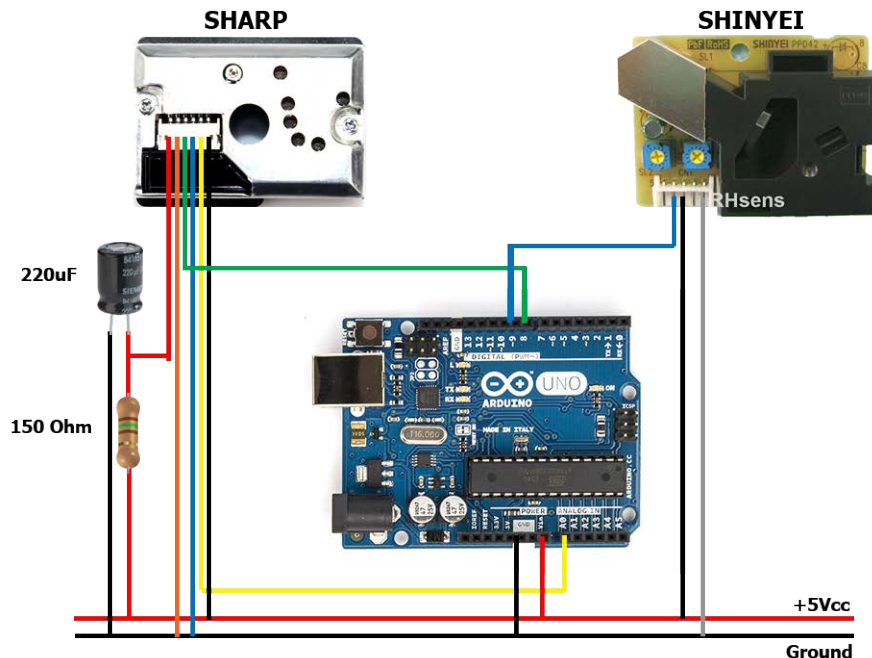


FIGURE 7.14 – Diagramme des connexions Sharp - Shinyei - Arduino.

### 7.4.6 Fichier de données géographiques - GeoJson

Dans l'élaboration de notre architecture client-serveur, nous avons choisi d'échanger les informations collectées au travers de fichiers conteneurs de type "geoJson". Ce type de fichier geoJson [10] est un sous-type du format "Json" standard. Cette spécialisation permet de contenir des collections de différents types de données comme des "Point", des "Polygon" et/ou des "properties" d'informations diverses. Ces informations sont accessibles sous la forme de clé : valeur. Ci-dessous un exemple d'un fichier geojson contenant une collection de caractéristiques "FeatureCollection", ligne 17, contenant un seul objet "features", ligne 2, qui représente un tableau de "Feature", ligne 11. Ce tableau contient à son tour des objets de différents types. Nous pouvons y voir un objet de type "Point", ligne 9, contenant des coordonnées cartographiques contenues dans la propriété tableau de type "geometry", ligne 3, et un objet de type "properties", ligne 12, contenant à son tour d'autres clés :valeurs qui sont la date de la création de la donnée en millisecondes (unix time), ligne 13, ainsi que sa valeur physique, ligne 14. Le tableau de "features" nous permettra d'accumuler un grand nombre d'objets de type particulier. Cette structure "geojson" établira un langage commun d'échange d'informations. L'import des bibliothèques

"org.json.jar" pour Java-Tomcat et "com.cocoahero.android.geojson" pour Android permettent la manipulation et la création de fichiers geojson.

```

1 {
2   "features": [{
3     "geometry": {
4       "coordinates": [
5         4.955887,
6         50.508574,
7         0
8       ],
9       "type": "Point"
10    },
11    "type": "Feature",
12    "properties": {
13      "date": "1439941109333",
14      "value1": "62.0"
15    }
16  ]},
17  "type": "FeatureCollection"
18 }
```

Le site JSONlint [14] permet de valider manuellement l'encodage des données clés : valeurs au sein du fichier. Cela nous a permis de valider la génération des fichiers geojson par programmation.

#### 7.4.7 Implémentation de la classe "MapViewActivity"

Dans la suite de l'élaboration de notre prototype nous avons ajouté certaines méthodes nécessaires à la mesure de la concentration particulaire et à l'activation de la carte externe IOIO-OTG. Le code Java montré à l'annexe 10.2 page 98 est volontairement simplifié pour en faciliter la compréhension.

A la ligne 6, nous pouvons voir la définition d'un nouveau thread. Ce thread est créé lors d'une pression sur le bouton labellisé "PM<sub>10</sub>". La nouvelle instance d'un objet de type "Runnable" impose d'implémenter sa méthode héritée "run()" à la ligne 13. Cette méthode contient, aux lignes 20-22, les variables qui représenteront les valeurs fournies par la carte IOIO et sa boucle "loop()". Ces valeurs seront affichées à l'écran aux emplacements prévus à cet effet, voir lignes 24-26. Les variables en lignes 30-32 nous sont utiles pour trouver la position géographique actuelle du smartphone. Nous passons ensuite, ligne 35 et 42, dans deux sélections qui permettront de vérifier si le module GPS du smartphone est activé

et si la précédente valeur collectée n'est pas trop proche du positionnement actuel. Si ces 2 conditions sont réunies et si les valeurs provenant de la boucle "loop()", en ligne 204, sont différentes de 0 alors nous pouvons considérer et enregistrer cette nouvelle mesure. Ce choix d'implémentation impose un parcours dynamique dans la collecte des données, nous devons nous déplacer continuellement. Cependant, il serait tout à fait possible d'enregistrer les données de façon continue et ce pour obtenir plus d'informations en un seul point géographique. Il s'agit d'un compromis à trouver pour constituer une représentation statistiquement significative.

La méthode, ligne 45, permet d'ajouter la donnée mesurée à la vue cartographique au travers d'une icône colorée. Ensuite, la valeur mesurée courante est enregistrée dans la base de données Sqlite aux lignes 51-63. Cette valeur courante est accompagnée des coordonnées géographiques et de la date du relevé de la mesure physique. A la ligne 74, nous stoppons et retardons de quelques centièmes de seconde l'exécution du déroulement de la méthode "run()". Cette méthode peut être considérée comme cyclique, tout comme la méthode "loop()" de la section IOIO Board ligne 204. Un nouveau cycle se répètera tant que nous ne stoppons pas le mode de mesure avec le bouton PM<sub>10</sub>.

La ligne 79, nous montre l'implémentation de la méthode "PostData()" qui est asynchrone, signifiant qu'elle se déroulera en parallèle du fil d'exécution de l'application sans la bloquer. Dans cette méthode, nous créons tous les fichiers conteneurs de données "geojson". Il existe ainsi quatre fichiers conteneurs différents. Un par type de donnée physique, RSSI, NOISE, POTHOLE, PM. A la ligne 96, nous itérons sur chaque fichier et nous créons les objets de type "HttpClient" et "HttpPost". Ces objets serviront à contenir les informations qui seront envoyées au serveur central. Nous n'envoyons des données que si le fichier conteneur courant possède au moins une valeur de type geojson, ligne 121.

La méthode suivante "onPostExecute()" à la ligne 152 est, comme son nom l'indique, appelée après l'envoi des données. Elle permet d'afficher les résultats des transmissions. Si les transmissions se sont correctement déroulées, les tables de la base de données sont vidées. Celles-ci seront alors prêtes pour enregistrer un nouveau jeu de données lors des mesures suivantes.

La classe MapViewerActivity possède une "Inner class" "Looper", c'est à dire une classe définie au sein d'une autre classe. Elle correspond à l'objet qui manipulera la carte IOIO. Cette classe étend le sur-type abstrait "BaseIOIOLooper" qui lui impose l'implémentation des deux classes suivantes, "setup()" et "loop()". Tout comme le code Arduino, la classe "setup()" est utilisée pour instancier et configurer les ports I/O qui seront utilisés de telle ou telle manière. Dans notre cas, nous créons une instance de l'objet "uart", ligne 194, du type "Uart". Cet objet ouvrira le port numéro 9 "rx" en "input" c'est-à-dire en mode

de réception de données. Il s'agit d'un objet qui utilise le protocole de communication RS-232 (UART).

La méthode "loop()" effectuera une itération toutes les 100 millisecondes. Durant cette itération, nous vérifions le contenu de l'objet de type "bufferedInputStream". La création d'une nouvelle instance de ce type d'objet, à la ligne 199, va avoir pour conséquence la création de thread d'écoute et de remplissage en continu de cette variable tampon. A la ligne 214, nous testons si le buffer contient le nombre de données que nous attendons en provenance du capteur. Si c'est effectivement le cas, nous pouvons consulter les valeurs entières qui sont contenues dans un tableau d'entiers "skResultTab[]". Ces différentes valeurs seront copiées dans les variables entières "skpm01", "skpm25", "skpm10". Ces variables seront appelées par la méthode "run()" du thread "Pm10".

Nous n'avons pas ajouté un schéma de connexion du capteur SEN0177 à la carte IOIO-OTG étant donné que ceux-ci ne sont reliés que par un unique fil. Le schéma étant très simple, une description textuelle fournira l'information nécessaire. En effet, la seule connexion est établie entre le port "tx" du module uart du capteur SEN0177 et le port numéro 9 "rx" de la carte IOIO. Les deux entités sont également reliées à des sources d'énergie. Une pile 9V alimente la carte IOIO et un régulateur de tension interne de celle-ci fournit une tension de 4,74V au capteur SEN0177. Une photo du prototype physique est disponible à la figure 7.15.

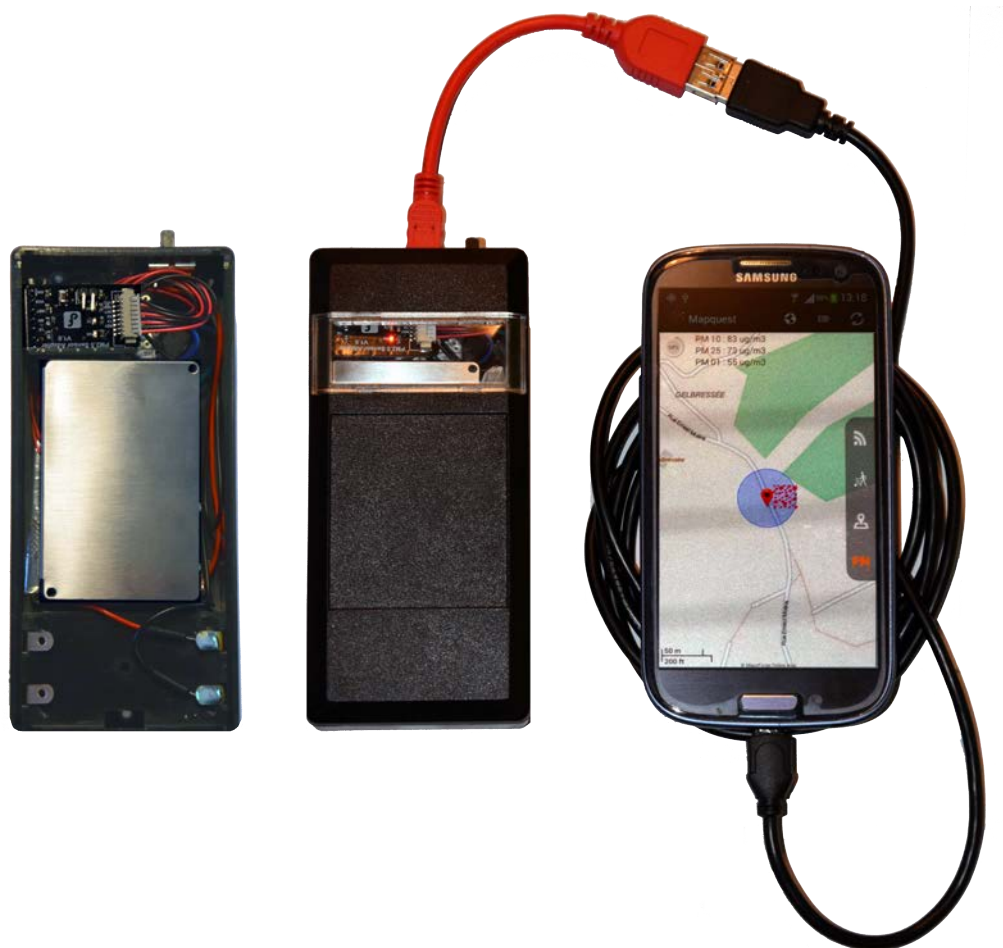


FIGURE 7.15 – Smartphone Samsung Galaxy S3 et module usb du prototype SEN0177, vue intérieure et extérieure.

Les différentes interfaces utilisateurs sont disponibles à la figure 7.16. Nous pouvons y trouver les différentes activités, ou vues, liées à la mesure et à la consultation des données collectées. Nous pouvons également voir des icônes colorées représentant visuellement le degré de concentration ou d'intensité des valeurs collectées.

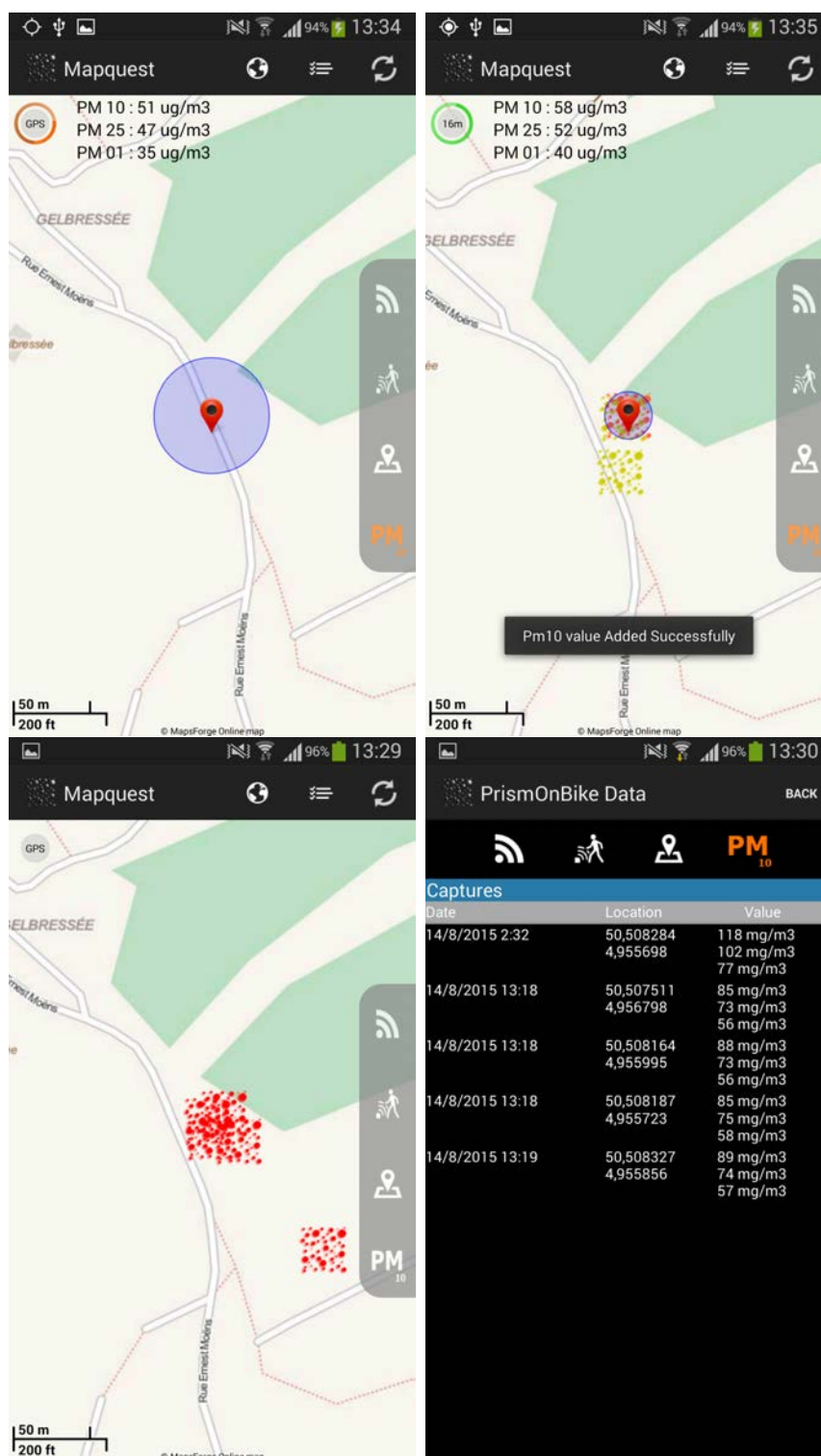


FIGURE 7.16 – Intégration mesure PM au sein de PrismOnBike.

### 7.4.8 Serveur central - PrismOnLine Viewer

L'application du serveur central a été réalisée en utilisant un conteneur de servlet "Apache Tomcat v7.0". Ce serveur a pour rôles la réception et l'accumulation des données envoyées par les smartphones "clients". La servlet `"/upload"` est accessible pour la réception des envois HTTP de type POST des données "geojson" provenant des clients. Cette servlet vérifie le type de fichier attendu et, si il convient, l'ajoute aux conteneurs de données. Chaque type de données a son propre fichier conteneur geojson. Ainsi, les données "RSSI", "NOISE", "POTHOLE" et "PM" sont respectivement stockées dans les fichiers `"datasetRSSI.geojson"`, `"datasetNOISE.geojson"`, `"datasetPOTHOLE.geojson"` et `"datasetPM.geojson"`.

Le code de la page JSP `"pm10.jsp"` permettant d'accéder aux données de type particulière PM10 est décrite en annexe 10.3 page 104. Le code est volontairement simplifié pour en faciliter la compréhension. Les lignes 11-21 montrent l'initialisation des variables des icônes colorées qui seront utilisées sur la vue cartographique. Un "marker" est un point représenté sur une carte et sa position dépend de sa propriété géographique de longitude et latitude. Chaque "marker" positionné a une couleur particulière représentant visuellement les divers degrés de concentration de pollution particulière. Il en est de même pour chaque type de donnée. Et chaque type possède sa propre échelle colorimétrique.

La ligne 23 nous montre l'initialisation de la variable "dataset" qui représente le fichier conteneur de données "geojson". La fonction `"ParseDataset()"`, en ligne 26, est utilisée pour lire le contenu du fichier "dataset". Cette lecture est permise grâce à une API javascript fournie par la librairie "Leaflet.js" [16]. Cette librairie contient plusieurs outils de manipulation de données cartographiques. Ainsi, la fonction `"L.geoJson(data,...)"`, ligne 33, permet le parcours de chaque objet "feature" existant au sein du fichier "dataset". Tous les objets "feature" sont passés successivement à différentes méthodes. La méthode `"PointToLayer(feature,latlng)"`, ligne 34, permet d'obtenir l'icône de la couleur adéquate en fonction de l'attribut "value1" de la "feature" courante et elle permet d'afficher cette icône aux coordonnées géographiques référencées dans l'objet de type "geometry". La méthode `"onEachFeature(feature,layer)"`, ligne 60, a pour rôle de lire l'attribut "value1" et de lier cette donnée à une étiquette. En effet, chaque "marker" affiché aura sa propre étiquette de type "pop-up" contenant les informations pertinentes de date, de positionnement et de la valeur physique collectée. La ligne 74 permet de retourner l'objet javascript "geojson" et de l'intégrer à une couche (Layer) de la vue cartographique appelée "markers-Group". Cette couche sera par la suite intégrée à la vue cartographique "map" à la ligne 89.

A la ligne 78, nous pouvons voir l'initialisation de la variable "roadView". Cette variable est instanciée grâce à la méthode `"L.tilelayer(...)"`. Les paramètres fournis à cette méthode contiennent les informations nécessaires à l'affichage du service de vue cartographique (Ba-

semaphore). Dans notre cas, nous utilisons les services fournis par le site "mapbox.com". Nous avons besoin de créer un compte utilisateur au préalable de l'utilisation de ce service de cartographie. Le compte utilisateur fournit une clé identifiante "access\_token" qui doit être introduite pour pouvoir utiliser les services de "mapbox.com". De nos jours, ce genre de services n'est plus rare sur internet et semble prospérer très rapidement. Il existe par exemple les fournisseurs comme "MapSense" ou "GoogleMaps" ou encore d'autres offres commerciales.

La figure 7.17 permet de voir le résultat de ce code en image. Sur cette illustration, nous pouvons apercevoir le menu horizontal supérieur de sélection de page affichant les différents types de données. Un filtre temporel permet de restreindre les "markers" affichés sur la carte en fonction de la plage de temps définie. Cette plage peut également être ajustée grâce à un "Slider" (Ligne verte). Cet outil permet de limiter visuellement et rapidement la plage temporelle de valeurs qui seront visibles ou non. Dans le cas où deux valeurs ont été collectées au même endroit, leurs icônes se superposeraient créant un mélange de couleurs. Il est cependant probable qu'elles n'aient pas été collectées au même moment. Dès lors, en utilisant le système de filtrage temporel nous pouvons les discerner. Dans l'état actuel de la visualisation, si il existe deux valeurs différentes collectées au même endroit et au même moment, il nous sera impossible de visualiser les deux informations. L'une ou l'autre aura la priorité d'accès. La résolution temporelle considérée au sein de ce système de visualisation est de l'ordre de la milliseconde, ce qui réduit les risques liés à ce cas de figure. Néanmoins le problème de superposition devra être résolu dans des recherches ultérieures.

Nous pouvons également voir les différentes icônes de couleurs de chaque type de relevé physique différent ainsi que l'étiquette informative associée. Chaque page des types de données possède une légende adéquate. La légende concernant les particules, visible aux pages pm10.jsp, pm25.jsp et pm01.jsp, nous informe visuellement de la correspondance entre la valeur physique et le degré de concentration de la mesure particulière. Nous avons volontairement choisi cette échelle de valeur et de couleur pour être conforme à l'échelle utilisée par le réseau CELINE [49].



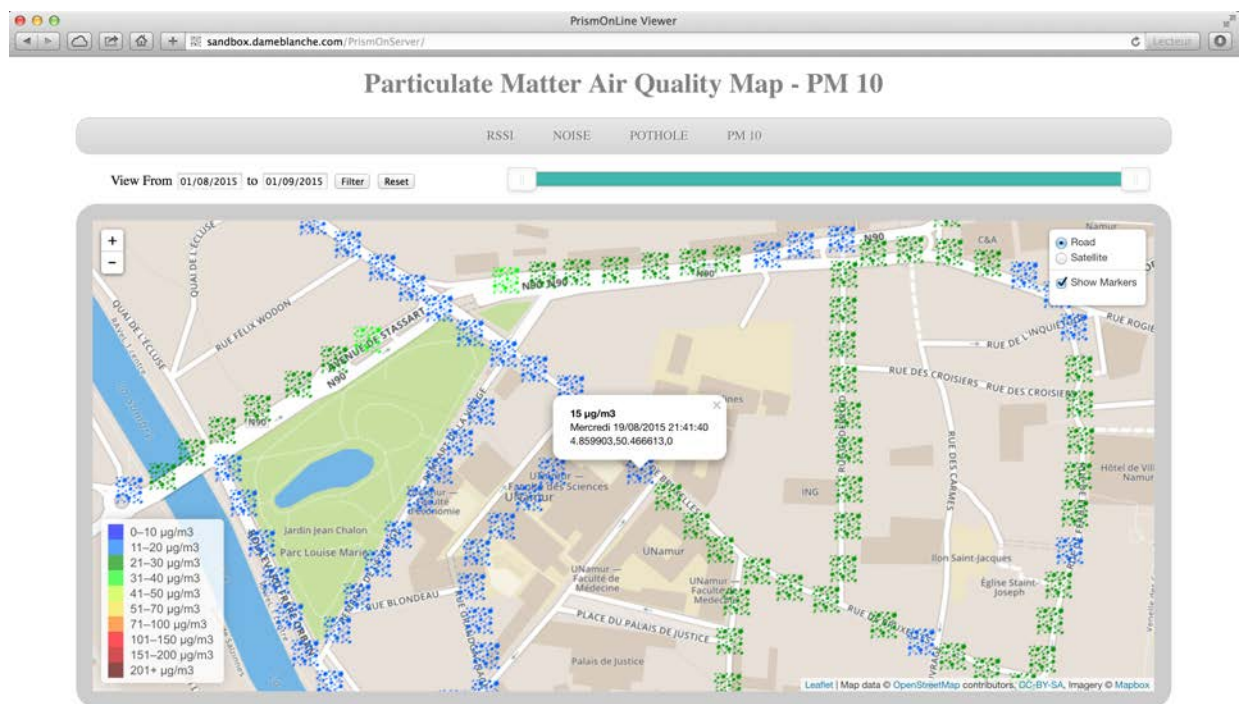


FIGURE 7.17 – Interface utilisateur de PrismOnLine Viewer.

## Preuve de concept - Tests et évaluations

### 8.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous allons comparer quelques résultats de collectes de particules effectuées par les 3 capteurs. Les capteurs Sharp et Shinyei seront contrôlés par la plateforme Arduino et le capteur DFRobot sera contrôlé par la carte IOIO directement depuis le programme "PrismOnBike". Cette application sera installée sur un smartphone Samsung Galaxy III modèle GT-I9300 dont le système d'exploitation est Android 4.3 (API level 18). Nous effectuerons ces différentes mesures à intervalles réguliers à coté d'une station de mesure officielle appartenant au réseau CELINE. Cette station de mesure nous fournira en référence un graphique d'évolution temporelle des valeurs de pollution particulaire.

### 8.2 Collection de données comparatives

Durant une après-midi, nous avons collecté les concentrations de particules à quelques mètres de la station de mesure officielle de Vezin (CELINE-43N073). Les données collectées par cette station sont rendues disponibles chaque jour. La figure 8.1 suivante montre les évolutions de concentrations des particules PM10 et PM2.5 du 23 au 24 août 2015.

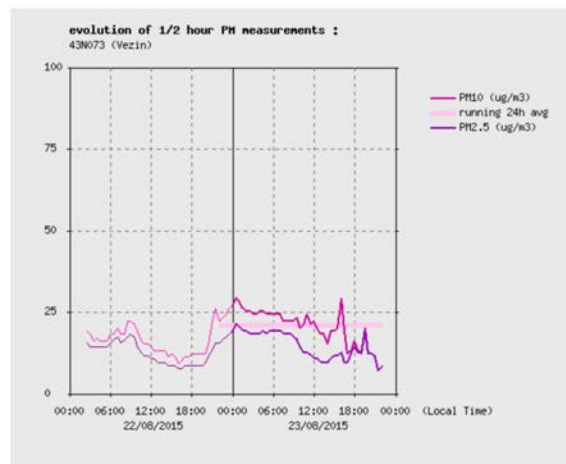


FIGURE 8.1 – Les données provenant de la station de Vezin 43N073 [49].

Le dimanche 23 août 2015 à Vezin, les concentrations moyennes sur une fenêtre glissante de 24 heures étaient de  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les particules PM10 et de  $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les particules PM2.5. L'évolution des valeurs officielles de concentrations particulières nous a ainsi permis d'effectuer une comparaison avec les valeurs collectées par les capteurs "low-cost". Nous avons collecté des données chaque heure, de 14h à 18h. Ces données sont disponibles à la figure 8.2.

		PM10	PM2.5	PM1.0
14h	SEN	13	13,5	11
	SHARP	41	-	-
	PPD	108	0,5	-
15h	SEN	26	27	22
	SHARP	43	-	-
	PPD	8	0,03	-
16h	SEN	12	12,5	10
	SHARP	53	-	-
	PPD	23	0,11	-
17h	SEN	10,5	11	9,5
	SHARP	49	-	-
	PPD	66	0,32	-
18h	SEN	15,5	17	13
	SHARP	46	-	-
	PPD	67	0,32	-

FIGURE 8.2 – Collection de données provenant des capteurs "low-cost".

Nous avons utilisé le graphique fourni par le réseau CELINE et nous y avons superposé les données des capteurs "low-cost". La figure 8.3 suivante nous montre les résultats.

La courbe officielle PM10 sera notre référence. Chaque évolution de concentrations de particules PM10 provenant des capteurs "low-cost" est représentée par une couleur différente. L'évolution du capteur DFRobot est de couleur verte, le capteur Sharp de couleur jaune et le Shinyei de couleur orange. Nous pouvons constater que les données sont très différentes pour chaque capteur.

Le capteur DFRobot a enregistré des valeurs très proches de la courbe de référence PM10. Nous pouvons constater que la courbe verte suit l'évolution de la courbe PM10 officielle avec une légère avance temporelle et un offset linéaire négatif d'environ  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les valeurs recueillies par le capteur Sharp semblent suivre les mêmes tendances mais de manières moins précises et souffrent également d'un offset positif de plus de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Des corrections linéaires appliquées aux valeurs de ces 2 capteurs pourraient approcher les valeurs de référence de la station de Vezin. Par contre, les données recueillies par le capteur Shinyei sont totalement décevantes. Aucune donnée ne correspond aux valeurs de référence. Soit les différentes étapes de calculs du LPO Time rendent les données inutilisables soit les hypothèses de masses particulières ou la formule de conversion imposent une trop grande approximation.

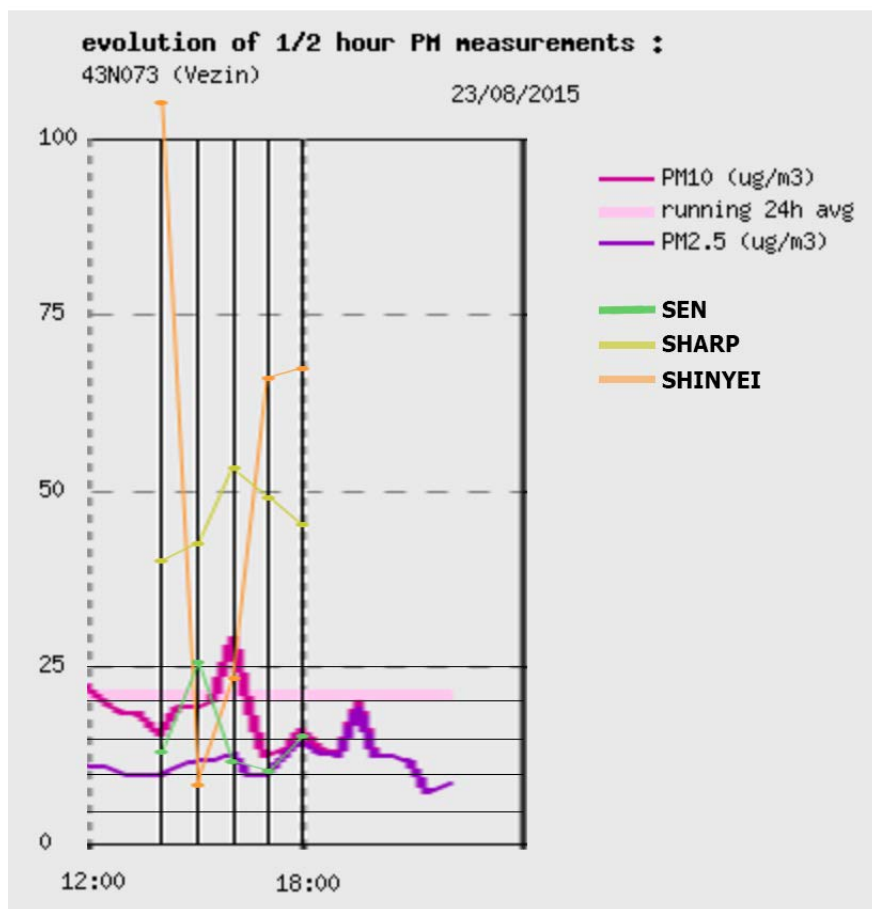


FIGURE 8.3 – Superposition aux données de la station de Vezin.

Les différentes valeurs collectées sont rendues disponibles par l'application du serveur central à l'adresse suivante <http://sandbox.dameblanche.com/PrismOnServer/>.

## 8.3 Comparatifs des capteurs de particules

Nous avons effectué 3 tests supplémentaires avec les différents capteurs. Nous les avons placés à la sortie d'un pot d'échappement d'un véhicule diesel en faisant vrombir le moteur ensuite, nous les avons placés près d'une taque de cuisson et pour finir nous avons soufflé de la fumée de cigarette dans leur direction. La figure 8.4 suivante présente les différents résultats.

		PM10	PM2.5	PM1.0
DIESEL	SEN	106	28	169
	SHARP	276	-	-
	PPD	157	0,76	-
CUISSON	SEN	202	180	131
	SHARP	167	-	-
	PPD	8972	43	-
FUMEE CIG	SEN	202	184	129
	SHARP	495	-	-
	PPD	13827	67	-

FIGURE 8.4 – Quelques mesures comparatives supplémentaires en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le capteur Sharp répond très rapidement à une variation de particules dans un volume d'air. Cependant, les valeurs instantanées fournies ne semblent pas être très réalistes. Le niveau de détection minimal de ce capteur se situe aux alentours des  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et son niveau maximal possible sature très rapidement à  $495 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Le seuil minimal de détection est induit par la conception même de ce capteur car il est causé par les réflexions parasites résiduelles et cela même sans la présence élevée de particules dans la zone de détection. Les valeurs se trouvent très souvent réparties aux deux extrémités de cette plage de réponse.

Le capteur Shinyei est très décevant et impose un temps de réponse très long en comparaison des 2 autres capteurs. Ceux-ci ont l'avantage de générer un résultat à partir d'une seule seconde après la mise sous tension. De plus, le capteur Shinyei semble très difficile à intégrer dans une application mobile de crowdsensing car il doit obligatoirement être utilisé verticalement pour faciliter l'aspiration du flux d'air créé par la résistance chauffante. Des recherches ultérieures seront nécessaires pour corriger ou améliorer la transformation de la valeur LPO Time vers les concentrations en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Le capteur DFRobot est le capteur le plus efficace et le plus simple à mettre en œuvre car il ne requiert qu'un seul fil pour communiquer (UART). Son principal avantage est qu'il nous fournit les valeurs collectées et calculées au travers d'un tableau d'entiers qu'il nous suffit de consulter. Il nous fournit des valeurs pour les particules PM10, PM2.5 et PM1.0 ce qui n'est pas le cas des autres capteurs. Sa calibration semble être très proche des capteurs professionnels de haute précision. De plus, ce capteur s'intègre parfaitement avec une application Android de crowdsensing. Cependant, de nombreuses campagnes de collecte seront requises pour améliorer et conforter ces résultats prometteurs.

## 8.4 Scénario d'utilisation "Mesurer la pollution PM"

Voyons à présent un scénario d'utilisation générale de "PrismOnBike" dans la mesure de la pollution particulaire avec notre prototype logiciel et son module de mesure externe.

**1** - Le module USB externe est câblé au smartphone et est alimenté.

**2** - L'application est lancée automatiquement par le protocole "Open Accessory" et nous mène vers la page principale "MapViewActivity".

*Informations supplémentaires : il existe actuellement un problème d'alimentation électrique entre Android et la carte IOIO lors du lancement automatique du logiciel utilisant la librairie IOIO et le protocole "Open Accessory". En effet, le port USB d'un smartphone est normalement utilisé lors des cycles de recharge de la batterie. Lorsque la carte IOIO est mise sous tension, Android suppose qu'il s'agit d'une source d'énergie externe et tente de démarrer un cycle de recharge. La carte IOIO n'étant pas prévue pour fournir le courant demandé, celle-ci se déconnecte pour éviter toute surcharge électrique. Ce problème n'apparaît que lors de la première connexion USB de la carte. Dans ce cas, il suffit de relancer le logiciel "PrismOnBike" de façon manuelle. Ce problème est malheureusement inhérent au port USB des smartphones en version officielle. Ce problème peut se contourner en désactivant le processus de recharge automatique du téléphone mais cela impose de manipuler les registres bas niveau de système Android. Cette manipulation supprime malheureusement toute garantie constructeur.*

**3** - Le service de cartographie par défaut "MapQuest" est chargé et affiche les différentes tuiles<sup>1</sup> de la position géographique actuelle. A la droite de ce premier écran nous pouvons faire apparaître un menu translucide qui se cache automatiquement au bout de quelques secondes. Les entrées de ce menu permettent de lancer l'exécution de threads qui effectueront à intervalles réguliers l'action de mesure désirée. Dans le cas présent, une pression sur le bouton "PM<sub>10</sub>" fera passer sa couleur à l'orange signifiant le lancement de ce mode d'action et le démarrage du thread associé. Dans notre cas, le thread associé à la mesure de pollution particulaire. Il relèvera et affichera les valeurs contenues des variables "loop.skpm10", "loop.skpm25", "loop.skpm01". Ces variables sont modifiées par le propre thread, lancé parallèlement, de la boucle "loop()" de la section de code concernant la carte IOIO 10.2 page 98.

**4** - L'exécution du thread va également activer un autre thread qui se chargera d'utiliser le module de positionnement GPS de l'application. Une fois que notre position géographique actuelle est trouvée et, si il n'existe pas encore de valeur enregistrée à cette

---

1. Les fragments carrés assemblés qui constituent la vue cartographique de l'écran

position précise, nous pouvons enregistrer les valeurs de pollution. Il est ainsi nécessaire de faire varier notre position en bougeant physiquement si nous souhaitons collecter de nouvelles données. Mais à nouveau, il ne s'agit que d'un choix d'implémentation. Il serait tout à fait envisageable d'enregistrer plusieurs valeurs différentes depuis un même emplacement géographique. Cette modification imposerait cependant un renouvellement dans l'affichage de l'icône courante. Si les valeurs sont modifiées, il faudra mettre à jour un éventuel changement de couleur. La méthode héritée "onTap(...)" permettant la création d'une étiquette devra elle aussi faire l'objet de modifications pour qu'elle remplace l'affichage de l'ancienne valeur par la nouvelle. Les valeurs effectivement collectées sont enregistrées dans la base de données Sqlite. Chaque valeur présente en base de données est affichée sur la carte. L'ajout d'une icône colorée représentative de l'échelle de valeur sur la vue cartographique nous permet de connaître les valeurs enregistrées ainsi que les informations de positionnement. Une nouvelle pression sur le bouton "PM<sub>10</sub>" mettra un terme aux threads associés.

**5** - Nous pouvons consulter toutes les données récoltées de façon visuelle via le service cartographique. Il est également possible de consulter les différentes listes de données. Il existe une liste par type de mesure effectuée. "PrismOnBike" possède donc 4 listes différentes ; RSSI, NOISE, POTHOLE, PM.

**6** - Nous pouvons envoyer les données récoltées au serveur central via une pression sur le bouton dont l'icône contient deux flèches inverses et arrondies. A ce moment, les fichiers conteneurs de données sont créés et sont envoyés un à un vers la servlet appropriée du serveur central. Seuls les fichiers contenant des données sont effectivement envoyés.

---

### Conclusion

---

La problématique de la qualité de l'air nous concerne tous. Différents polluants sont présents aussi bien en atmosphère intérieure qu'en atmosphère extérieure. Nous devons prendre conscience des phénomènes de création et de dispersion des polluants pouvant avoir un impact nocif sur la santé humaine et sur notre environnement.

L'activité citoyenne est en marche ! Elle se constate au travers du nombre croissant de projets de conceptions de systèmes électroniques quels qu'ils soient. Le mouvement "Do it yourself" de ces dernières années conforte cette tendance montante. Plutôt que d'attendre qu'un rapport officiel soit émis ou qu'une autorité de gestion se décide à effectuer des relevés de pollution, les citoyens sont désormais capables de construire et d'utiliser des systèmes de mesure relativement efficaces de plus en plus facilement. L'accès facilité de l'apprentissage des technologies des micro-contrôleurs couplés aux commerces de divers capteurs de valeurs physiques à des prix abordables permet à tout un chacun de construire le projet de son choix.

La plateforme Android nous offre de multiples facettes dans le développement d'applications de crowdsensing. Les smartphones sont dotés de différentes technologies embarquées et participent de façon très active et très différente en fonction des services souhaités. Par exemple, les microphones des téléphones sont utilisés pour mesurer un niveau de bruit ambiant, les caméras fournissent des vidéos et des photos annotées ou encore un service de scan (QRCode), les modules GPS embarqués produisent des points de référence ou de confirmation de géo-localisation. Ainsi, tous les capteurs techniques possibles et imaginables sont et seront sans doute utilisés dans un but spécifique afin d'enrichir un contenu ou une activité.

Les capteurs de pollution utilisant les technologies se basant sur des variations de phénomènes lumineux ont un avantage indéniable dans la robustesse et la fiabilité d'utilisation. Malgré quelques désavantages inhérents aux principes de captation, les capteurs de types électrochimiques évoluent et s'améliorent rapidement. La miniaturisation de tous ces capteurs permet de fabriquer de petites cellules indépendantes et complémentaires de mesures de pollution communiquant grâce au réseau Internet. L'internet des objets va probablement connaître son apogée d'ici quelques années et les technologies appliquées évolueront encore certainement en facilitant encore leurs accès et leurs apprentissages.



L'adjonction d'un module externe de mesure de matière particulaire pour notre prototype n'est pas encore très pratique dans l'usage quotidien d'un smartphone : le module est trop volumineux et trop énergivore. Son autonomie maximum est de 30 minutes. Néanmoins ce prototype nous a permis de constater que les valeurs recueillies par des capteurs "low-cost" ne sont pas très éloignées des valeurs collectées par des systèmes professionnels de haute précision et d'un coût bien plus élevé. Ceux-ci seront néanmoins toujours nécessaires comme référence de calibration.

La suite de ce projet d'étude pourrait être la diffusion de l'application sur un grand nombre de smartphones et le suivi des collections de données. Le site internet pourrait être amélioré en proposant des valeurs moyennes glissantes sur 8h ou 24h, exactement comme propose le site internet du réseau CELINE. Ce mémoire pourrait aussi servir de point de départ dans la conception d'un système plus complet de détection de gaz polluants. Le concept de nez électronique pourrait être une approche envisageable dans la conception d'une matrice de divers capteurs. Il serait capable de définir l'atmosphère et ses constituants de manière très sophistiquée.

---

**Annexe**

---

**10.1 Implémentation Arduino R3**

```
1  byte SELECTOR_PIN = 2;           // VAR Switch Selection
2  int selection = 0;
3
4  byte pinPWMSHarp = 8;           // SHARP VARS
5  float voMeasured = 0;
6  float calcVoltage = 0;
7  float SHARPDensity = 0;
8
9  byte pinPulseShinyei = 9;       // SHINYEI VARS
10 unsigned long starttime;
11 unsigned long sampletime_ms = 30000;
12 unsigned long lowpulseoccupancy = 0;
13 float ratio = 0;
14 float concentration = 0;
15 float PPD42DPM10 = 0;
16 float PPD42DPM25 = 0;
17 boolean sentinel = true;
18
19 void setup() {
20     Serial.begin(9600);
21
22     // CONFIGURATION PIN I/O
23     pinMode(pinPWMSHarp, OUTPUT);    // SHARP OUTPUT PMW
24     pinMode(pinPulseShinyei, INPUT); // SHINYEI INPUT LOW
25
26     pinMode(SELECTOR_PIN, INPUT);
27 }
28
29 void loop() {
30
31     selection = digitalRead(SELECTOR_PIN);
32
```

---

```

33     if (selection){                                     // SHARP GP2Y1010AU0F
34
35         digitalWrite(pinPWMSHarp, LOW);               // power on the LED
36         delayMicroseconds(175);                       // Normally 280 = 432us !!! 175 = 320us
37         voMeasured = analogRead(0);                   // Read the dust value
38         delayMicroseconds(25);                        // Normally 40 microseconds
39         digitalWrite(pinPWMSHarp, HIGH);              // power off the LED
40         delayMicroseconds(9680);                      // End of Period T = 10ms
41
42         calcVoltage = voMeasured * (4.74 / 1024);
43         SHARPDensity = 0.17 * calcVoltage - 0.1;
44
45         if (SHARPDensity < 0) SHARPDensity = 0;
46
47         SHARPDensity = SHARPDensity *1000; // display in microgram/m3
48
49         delay(990);                                   // 990ms + 10ms = 1sec
50
51         Serial.print(voMeasured,0);
52         Serial.print(", ");
53         Serial.print(calcVoltage,3);
54         Serial.print(", ");
55         Serial.println(SHARPDensity,0);
56
57     } else {                                           // SHINYEI PPD42NS
58
59         sentinel = true;
60         starttime = millis();
61         while(sentinel){
62             lowpulseoccupancy = lowpulseoccupancy+pulseIn(pinPulseShinyei,LOW);
63
64             if ((millis()-starttime) > sampletime_ms){
65
66                 ratio = lowpulseoccupancy/(sampletime_ms*10);
67
68                 // By curve sheet
69                 concentration = 1.1*pow(ratio,3)-3.8*pow(ratio,2)+520*ratio+0.62;
70
71                 //Concentration (microgram/m3)
72                 PPD42DPM10 = concentration * 4.292459 ; //PM10

```

```

73         PPD42DPM25 = concentration * 0.020804 ; //PM2.5
74
75         Serial.print(lowpulseoccupancy);
76         Serial.print(", ");
77         Serial.print(ratio,3);
78         Serial.print(", ");
79         Serial.print(concentration,3);
80         Serial.print(", ");
81         Serial.print(PPD42DPM10,3);
82         Serial.print(", ");
83         Serial.println(PPD42DPM25,3);
84
85         sentinel = false;
86         lowpulseoccupancy = 0;
87     }
88 }
89 }
90 }

```

## 10.2 Implémentation "MapViewActivity"

```

1  public class MapViewerActivity extends MapViewer {
2
3      {...}
4
5      // THREAD
6      private final Runnable Pm10 = new Runnable() {
7
8          private double lat_gps=0;
9          private double long_gps=0;
10         private Integer sk0177_10 = 0;
11         private Integer sk0177_25 = 0;
12         private Integer sk0177_01 = 0;
13
14         @Override
15         public void run() {
16
17             long update = 500; // Every 500ms
18             boolean check = false;
19
20             sk0177_10 = loop.skpm10;

```

```

21      sk0177_25 = loop.skpm25;
22      sk0177_01 = loop.skpm01;
23
24      valueOnX.setText("PM 10 : " + sk0177_10 + " ug/m3" );
25      valueOnY.setText("PM 25 : " + sk0177_25 + " ug/m3" );
26      valueOnZ.setText("PM 01 : " + sk0177_01 + " ug/m3" );
27
28      try{
29          try{
30              lat_gps = Double.valueOf(provider.getLocation().getLatitude());
31              long_gps = Double.valueOf(provider.getLocation().getLongitude());
32              latLong1 = new LatLong(lat_gps, long_gps);
33          } catch(Exception e){ Log.e("", "LatLong : "+e.getMessage());}
34
35          if( provider.getGps_activated()==1
36              && lat_gps!=lat_gps_verif
37              && long_gps!=long_gps_verif
38              && (sk0177_10 != 0 && sk0177_25 != 0 && sk0177_01 != 0) ){
39
40              // Check if value is too near from last value
41              // if false doesn't take a new one
42              check=checkArrayList(latLong1);
43              if(check==true) {
44
45                  addOverlayPmLayers(layerManagers.get(0).getLayers(),
46                                  latLong1,
47                                  sk0177_10,
48                                  sk0177_25,
49                                  sk0177_01);
50
51                  values.put(DBHelper.C_DATE,
52                          day + "/" + month + "/" + year + " " + hours + ":" + min);
53                  values.put(DBHelper.C_GPS_LAT,
54                          String.format("%5f", latLong1.latitude));
55                  values.put(DBHelper.C_GPS_LNG,
56                          String.format("%5f", latLong1.longitude));
57                  values.put(DBHelper.C_PM10, sk0177_10);
58                  values.put(DBHelper.C_PM25, sk0177_25);
59                  values.put(DBHelper.C_PM01, sk0177_01);
60

```

```

61         try { db = helper.getWritableDatabase();
62             db.insert(DBHelper.TABLE_PM, null, values);
63             db.close();
64         } catch (Exception e){
65             Log.e("", " Insertion TABLE_PM : "+e.getMessage());
66         }
67         "Pm10 value Added Successfully"
68     }
69 }
70 } catch(Exception e){}
71
72     lat_gps_verif=lat_gps;
73     long_gps_verif=long_gps;
74     PMHandler.postDelayed(Pm10, update);
75 }
76 };
77
78 // HTTP SEND DATASET
79 public class PostData extends AsyncTask<String, Void, String> {
80
81     private int statusCode;
82     boolean[] dataReallySent = new boolean[4];
83     boolean[] FileWithDataExists;
84
85     protected String doInBackground(String... params) {
86
87         HttpResponse response = null;
88         String responseString = "";
89         File file;
90
91         // Create or rewrite the dataset geojson file from data in database
92         FileWithDataExists = createGeoJSONFiles();
93
94         // For each geojson file presents in AlltheFiles String[]
95         // we try to upload data to tomcat server
96         for (int i = 0; i < AlltheFiles.length; i ++) {
97
98             file = new File(Environment.getExternalStorageDirectory()
99                             .getPath()
100                             + "/Android/data/com.example.PrismOnBikePM10/files/",

```

```
101         AlltheFiles[i]);
102
103         HttpClient client = new DefaultHttpClient();
104         HttpPost post = new HttpPost(url);
105
106         MultipartEntityBuilder builder = MultipartEntityBuilder.create();
107         builder.setMode(HttpMultipartMode.BROWSER_COMPATIBLE);
108
109         // "attribut name", " real data " , "type of data transmitted"
110         builder.addTextBody(file.getName(),
111                             setIntoString(file),
112                             ContentType.APPLICATION_JSON);
113
114         HttpEntity entity = builder.build();
115         post.setEntity(entity);
116
117         currentFile = AlltheFiles[i];
118         statusCode = 0;
119
120         // Only if file [i] is fulfilled then we can send it
121         if (FileWithDataExists[i]) {
122
123             try {
124                 response = client.execute(post);
125                 responseString = responseString + getContent(response);
126                 if (response != null)
127                     statusCode = response.getStatusLine().getStatusCode();
128             } catch (IOException ignore) {
129                 if (response != null)
130                     statusCode = response.getStatusLine().getStatusCode();
131             }
132
133             // If transmission problem
134             if (statusCode == 0 || statusCode >= 400) {
135                 dataReallySent[i]=false;
136             }
137             else // Great transmission OK – data sent !
138             {
139                 if (statusCode == 200 || statusCode == 201){
140                     dataReallySent[i]=true;
```

```

141         }
142     }
143 }
144 else
145 { // Nothing to send for this file so...
146     dataReallySent[i]=false;
147 }
148 } // End For loop
149 return responseString;
150 }
151
152 protected void onPostExecute(String result) {
153
154     if (statusCode >= 400) {
155         "Failed to connect to web server !"
156     }
157     else
158     { // Server was responding so we can check what has been sent
159         for (int i = 0; i < dataReallySent.length; i++) {
160             if (dataReallySent[i]) {
161                 killAndRecreateDatabase(i);
162                 "Successfully sent to web server file i"
163             }
164             else
165             {
166                 "Nothing to send for file i"
167             }
168         }
169     }
170 }
171 }
172
173 // IOIO BOARD SECTION
174 private final Looper loop = new Looper();
175
176 class Looper extends BaseIOIOLooper {
177
178     //SENSOR SEN0177 - UART vars
179     private int tx = 7;
180     private int rx = 9;

```



```

181     private int baudrate = 9600;
182     private Uart uart = null;
183     private BufferedInputStream bufferedInputStream = null;
184     private int[] skResultTab = null;
185     private int length = 0;
186     public int skpm10 = 0;
187     public int skpm25 = 0;
188     public int skpm01 = 0;
189
190     @Override
191     protected void setup() throws ConnectionLostException {
192
193         // UART
194         uart = ioio_.openUart( rx,
195                               IOIO.INVALID_PIN,
196                               baudrate,
197                               Uart.Parity.NONE,
198                               Uart.StopBits.ONE );
199         bufferedInputStream = new BufferedInputStream(uart.getInputStream(),24);
200         skResultTab = new int[24];
201     }
202
203     @Override
204     public void loop() throws ConnectionLostException, InterruptedException {
205
206         Thread.sleep(100);
207
208         // UART SERIAL FROM SEN0177
209         try {
210             length = bufferedInputStream.available();
211         } catch (IOException e) {
212             Log.e("", " IOException !!! " + e.getMessage()); }
213
214         if (length == 24) {
215             try {
216                 for (int i = 0; i < length; i++) {
217                     skResultTab[i] = bufferedInputStream.read();
218                 }
219             } catch (IOException e) {
220                 System.out.println("IOException !!! " + e.getMessage());

```

```

221     }
222     skpm01 = skResultTab[5]; //PM1.0 value of air detector module
223     skpm25 = skResultTab[7]; //PM2.5 value of air detector module
224     skpm10 = skResultTab[9]; //PM10 value of air detector module
225 }
226 }
227 }
228 }

```

## 10.3 Implémentation du serveur central

```

1 <html>
2 <head>
3 {...}
4 </head>
5 <body><h1>Particulate Matter Air Quality Map – PM 10</h1>
6
7 <div id="map"></div>
8
9 <script type="text/javascript">
10
11 var darkBlueIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_0_10.png',iconSize:[40,40]});
12 var lightBlueIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_11_20.png',iconSize:[40,40]});
13 var darkGreenIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_21_30.png',iconSize:[40,40]});
14 var greenIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_31_40.png',iconSize:[40,40]});
15 var lightGreenIcon= L.icon({iconUrl:'images/particules_41_50.png',iconSize:[40,40]});
16 var yellowIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_51_70.png',iconSize:[40,40]});
17 var orangeIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_71_100.png',iconSize:[40,40]});
18 var redIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_101_150.png',iconSize:[40,40]});
19 var darkRedIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_151_200.png',iconSize:[40,40]});
20 var purpleRedIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_201_MAX.png',iconSize:[40,40]});
21 var blackIcon = L.icon({iconUrl:'images/particules_black.png',iconSize:[40,40]});
22
23 var dataset = $.getJSON("datasetPM.geojson");
24 var markersGroup = L.layerGroup();
25
26 ParserDataset();
27
28 function ParserDataset(){
29
30     var dataExists = 0;

```

```

31
32 dataset.then(function(data) {
33     var geojson = L.geoJson(data,{ // Parsing geojson file
34         pointToLayer: function(feature,latlng){
35             var value = feature.properties.value1;
36             switch(true){
37                 case ((value >= 0)&&(value <= 10)):
38                     return L.marker(latlng,{icon: darkBlueIcon});
39                 case ((value >= 11)&&(value <= 20)):
40                     return L.marker(latlng,{icon: lightBlueIcon});
41                 case ((value >= 21)&&(value <= 30)):
42                     return L.marker(latlng,{icon: darkGreenIcon});
43                 case ((value >= 31)&&(value <= 40)):
44                     return L.marker(latlng,{icon: greenIcon});
45                 case ((value >= 41)&&(value <= 50)):
46                     return L.marker(latlng,{icon: lightGreenIcon});
47                 case ((value >= 51)&&(value <= 70)):
48                     return L.marker(latlng,{icon: yellowIcon});
49                 case ((value >= 71)&&(value <= 100)):
50                     return L.marker(latlng,{icon: orangeIcon});
51                 case ((value >= 101)&&(value <= 150)):
52                     return L.marker(latlng,{icon: redIcon});
53                 case ((value >= 151)&&(value <= 200)):
54                     return L.marker(latlng,{icon: darkRedIcon});
55                 case ((value >= 201)&&(value <= 300)):
56                     return L.marker(latlng,{icon: purpleRedIcon});
57                 default : return L.marker(latlng,{icon: blackIcon});
58             }
59         },
60         onEachFeature: function (feature, layer) {
61             dataExists++;
62             layer.bindPopup('<b>'+feature.properties.value1+'&micro;g/m3'+</b>'
63                 + '<br />'
64                 + feature.properties.date
65                 + '<br />'
66                 + feature.geometry.coordinates );
67         }
68     }) // End parsing geojson file
69
70     // Ajust view map size with all markers visible

```

```
71     if (dataExists > 0){
72         map.fitBounds(geojson.getBounds(),{ padding: [20, 20] });
73         markersGroup.clearLayers();
74         geojson.addTo(markersGroup);
75     }
76 });
77 }
78 var roadView = L.tileLayer('https://api.tiles.mapbox.com/v4/{id}/{z}/{x}/{y}.png?
79 access_token={accessToken}', {attribution: 'Map data &copy;
80 <a href="http://openstreetmap.org">OpenStreetMap</a> contributors,
81 Imagery <a href="http://mapbox.com">Mapbox</a>',
82 maxZoom: 20, minZoom: 9, id: '...', accessToken: '...'
83 });
84
85 var map = L.map('map', { zoom: 15, layers: [roadView,markersGroup]});
86
87 var baseMaps = { "Satellite": satelliteView,"Road": roadView};
88 var overlayMaps = { "Show Markers": markersGroup};
89 L.control.layers(baseMaps,overlayMaps).addTo(map);
90 {...}
91 </script>
92 </body>
93 </html>
```

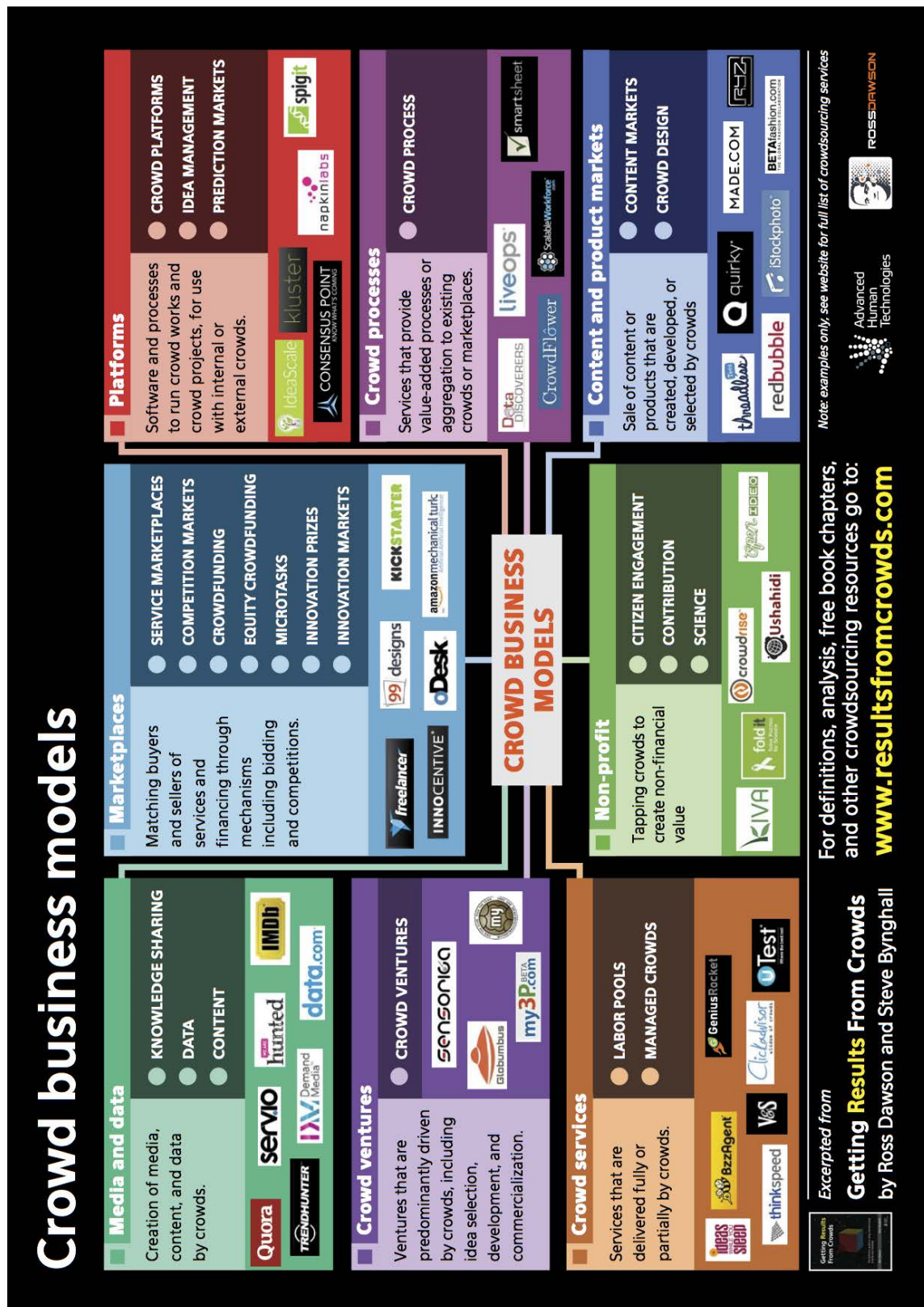


FIGURE 10.1 – Schéma récapitulatif des Business-Model du Crowdsourcing  
Provenant du site compagnon du livre "Getting Results from crowds" [76]

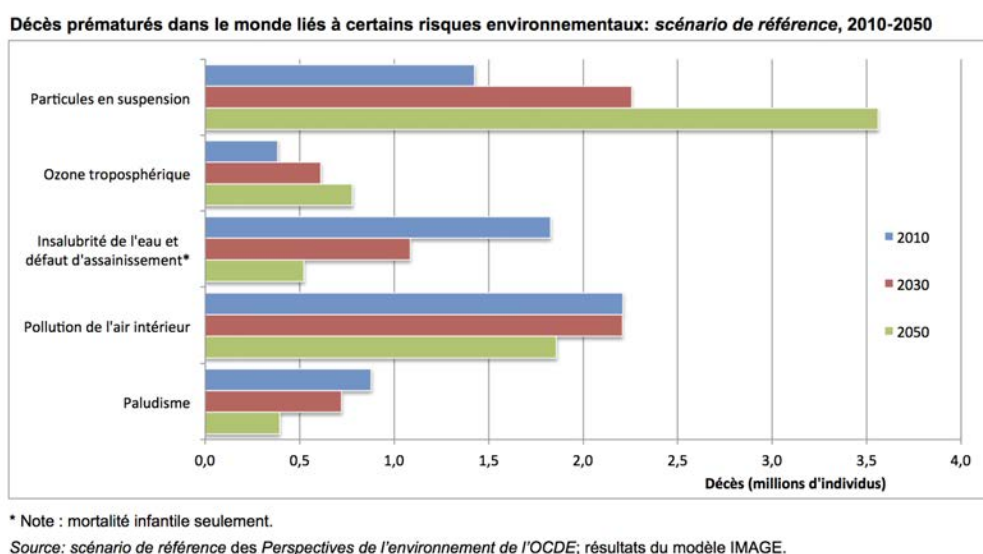


FIGURE 10.2 – Décès prématurés dans le monde liés aux risques environnementaux  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]

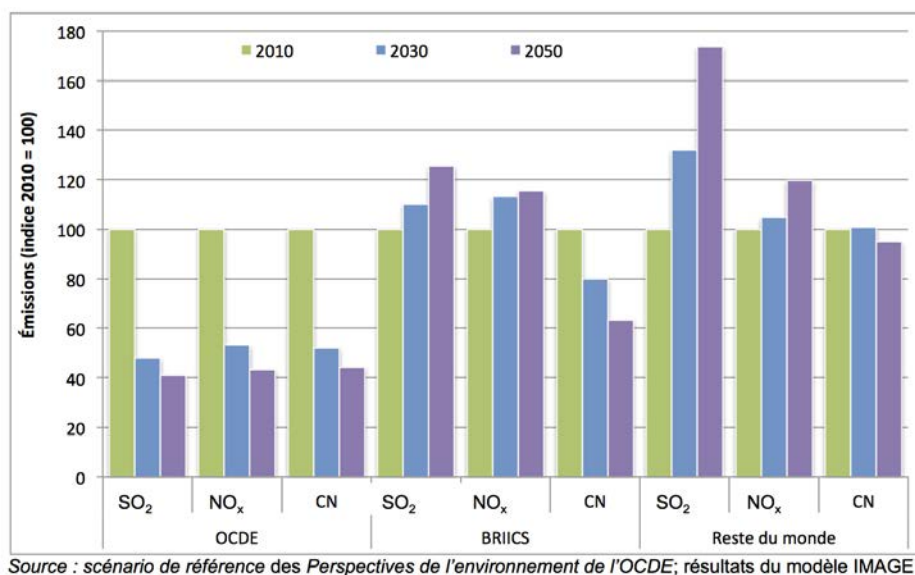


FIGURE 10.3 – Emissions de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CN  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]

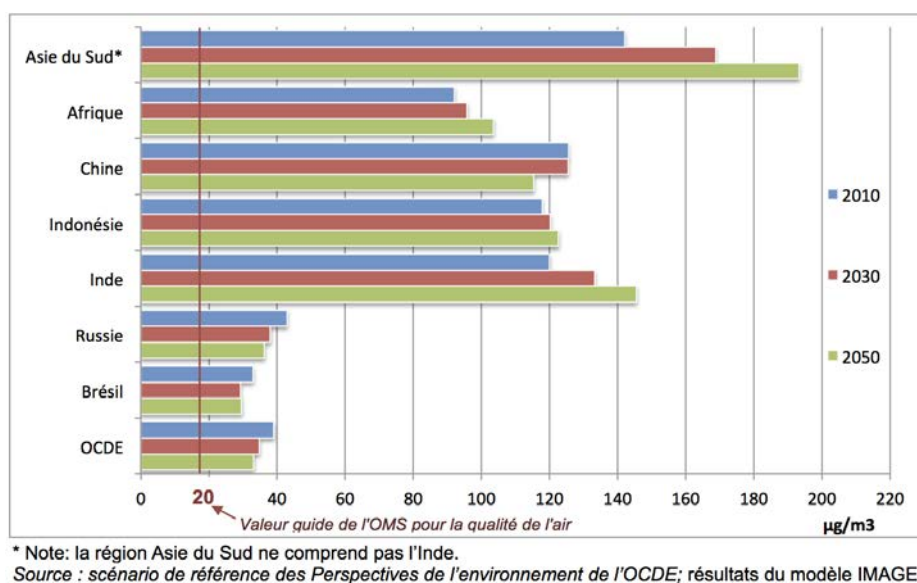


FIGURE 10.4 – Concentrations de PM10 de quelques pays  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]

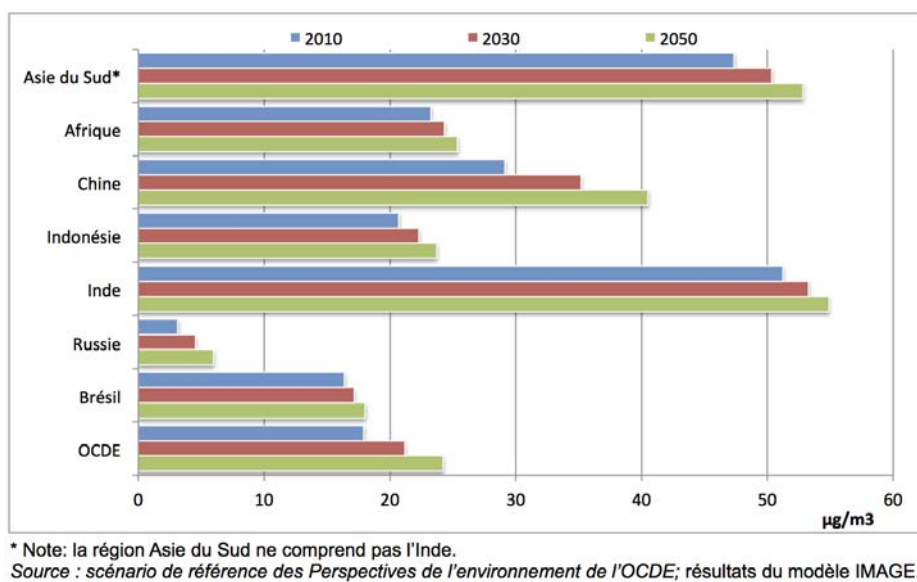


FIGURE 10.5 – Concentrations d'ozone troposphérique de quelques pays  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]



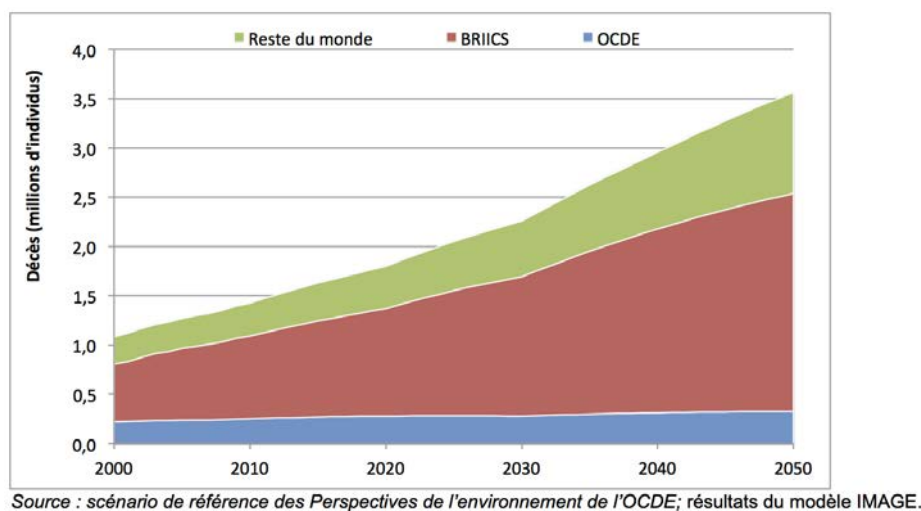


FIGURE 10.6 – Décès prématurés dans le monde imputables à l'exposition aux particules  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]

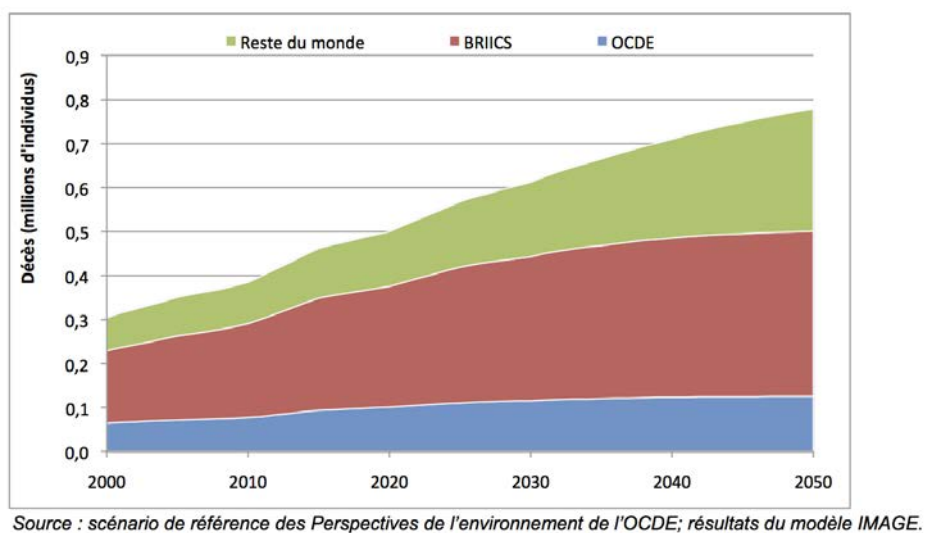


FIGURE 10.7 – Décès prématurés dans le monde imputables à l'exposition à l'ozone troposphérique  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]



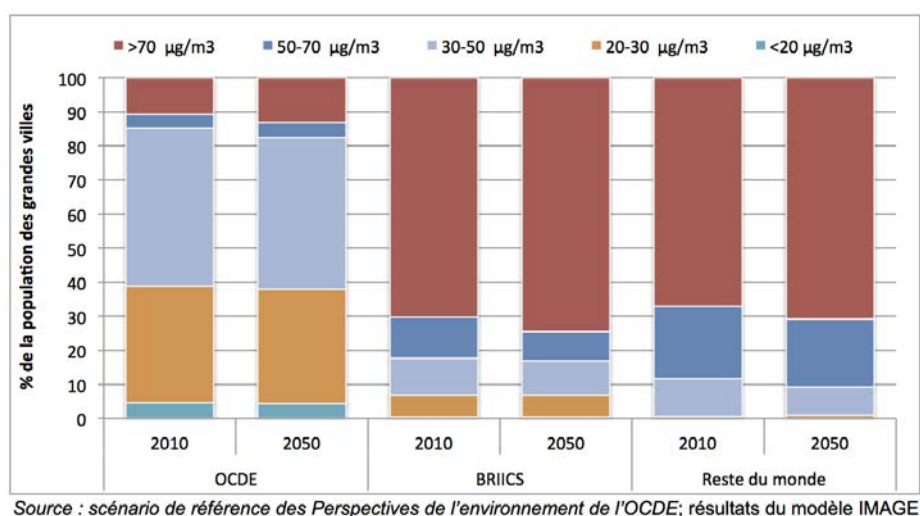


FIGURE 10.8 – Population urbaine et concentrations moyennes annuelles de PM10  
Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85]

Directive	Date de parution	Cible
80/779/EEC (C.E., 1980)	15-juillet-1980	SO <sub>2</sub> et PM <sub>10</sub>
82/884/EEC (C.E., 1982)	3-December-1982	NO <sub>x</sub>
85/283/EEC (C.E., 1985)	7-Mars-1985	
92/72/EEC (C.E., 1992)	21-Septembre-1992	O <sub>3</sub>
1999/30/CE (C.E., 1999)	22-Avril-1999	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> & NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , Pb
2000/69/CE (C.E., 2000)	16-Novembre-2000	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , CO
2002/3/CE (C.E., 2002)	12-Février-2002	O <sub>3</sub>
2004/107/CE (C.E., 2004)	15-décembre-2004	As, Cd Hg, Ni et HAP
2008/50/CE (C.E., 2008)	21-mai-2008	SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> & NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , Pb, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , CO, O <sub>3</sub> .

FIGURE 10.9 – Directives européennes pour la protection et réglementation de la qualité de l'air

Indice	Qualité	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
1	Très bon	0-39	0-29	0-29	0-6
2	Très bon	40-79	30-54	30-54	7-13
3	Bon	80-119	55-79	55-84	14-20
4	Bon	120-159	80-104	85-109	21-27
5	Moyen	160-199	105-129	110-134	38-34
6	Médiocre	200-249	130-149	135-164	35-41
7	Médiocre	250-299	150-179	165-199	42-49
8	Mauvais	300-399	180-209	200-274	50-64
9	Mauvais	400-499	210-239	275-399	65-79
10	Mauvais	≥ 500	≥ 240	≥ 400	≥ 80

FIGURE 10.10 – Indice ATMO pour la qualité de l'air en France

Polluant		µg/m <sup>3</sup>									
SO <sub>2</sub>	moyenne 24h	0 - 15	16 - 30	31 - 45	46 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 125	126 - 165	166 - 250	> 250
NO <sub>2</sub>	Maximum journalier de la moyenne horaire	0 - 25	26 - 45	46 - 60	61 - 80	81 - 110	111 - 150	151 - 200	201 - 270	271 - 400	> 400
O <sub>3</sub>	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures	0 - 30	31 - 45	46 - 60	61 - 80	81 - 100	101 - 120	121 - 150	151 - 200	201 - 270	> 270
PM <sub>10</sub>	moyenne 24h	0 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 70	71 - 100	101 - 150	151 - 200	> 200
indice		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
appréciation		excellent	très bon	bon	assez bon	moyen	médiocre	très médiocre	mauvais	très mauvais	exécrable

FIGURE 10.11 – Indice BELATMO pour la qualité de l'air en Belgique

Gaz Cible	Objectif de qualité	Valeurs limites pour la protection de la santé humaine	Valeur limite pour la protection de la végétation	Seuil d'information	Seuils d'alerte
NO <sub>2</sub>	40 µg/m en moyenne annuelle	200 µg/m en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 18 heures par an (Centile 99,8)		200 µg/m en moyenne horaire	400 µg/m en moyenne horaire
		44 µg/m (40 µg/m en 2010) en moyenne annuelle	30 µg/m <sup>3</sup> en moyenne annuelle		ou si 200 µg/m <sup>3</sup> en moyenne horaire à J-1 et à J, et prévision de 200 µg/m <sup>3</sup> à J+1
NO <sub>x</sub>					
O <sub>3</sub>		à compter de 2010 120 µg/m maximum journalier de la moyenne sur 8 heures à ne pas dépasser plus de 25 jours par an(en moyenne sur 3 ans)	6 000 µg/m .h en AOT40, calculée à partir des valeurs sur 1 heure de mai à juillet (en moyenne sur 5 ans)	180 µg/m en moyenne horaire	1er seuil : 240 µg/m moyennes horaires pendant 3 heures consécutives 2° seuil : 300 µg/m moyennes horaires pendant 3 heures consécutives
					3° seuil : 360 µg/m en moyenne horaire
CO		10 mg/m soit 10 000 µg/m pour le maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures			
SO <sub>2</sub>	50 µg/m en moyenne annuelle	350 µg/m en moyenne horaire à ne pas dépasser plus de 24 heures par an (Centile 99,7)	20 µg/m en moyenne annuelle et en moyenne sur la période du 1er octobre au 31 mars	300 µg/m en moyenne horaire	500 µg/m en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives
		125 µg/m en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 3 jours par an (Centile 99,2)			
BENZÈNE	2 µg/m en moyenne annuelle	5 µg/m en moyenne annuelle			
BENZO-(a)-PYRÈNE	à compter de 2013 1 ng/m en moyenne annuelle dans la fraction PM <sub>10</sub>				
	30 µg/m en moyenne annuelle	50 µg/m en moyenne journalière à ne pas dépasser plus de 35 jours par an (Centile 90,4)		80 µg/m en moyenne sur 24 heures	125 µg/m en moyenne sur 24 heures
PM <sub>10</sub>		40 µg/m en moyenne annuelle			

FIGURE 10.12 – Récapitulatif des objectifs de qualité de l'air et limites imposées par la directive européenne 200850CE [68]

Type de Capteur	Grandeur mesurée	Avantages	Inconvénients	Limite de détection
Electrolyte solide	Tension ou courant	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Miniaturisation</li> <li>- Résistance aux chocs thermiques et pression</li> <li>- Variation linéaire du signal</li> <li>- Temps de réponse faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etalonnage nécessaire</li> <li>- Complexité d'utilisation</li> <li>- Durée de vie limitée (2 ans)</li> <li>- coût élevé (~100€)</li> </ul>	10-20 ppm
Capacitif	Capacité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicité d'implémentation</li> <li>- Faible coût (&lt;10€)</li> <li>- Faible consommation électrique</li> <li>- Miniaturisation</li> <li>- Temps de réponse rapide</li> <li>- Longue durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Système de mesure complexe</li> <li>- Forte interférence avec l'eau</li> <li>- Manque de sélectivité</li> </ul>	~10 ppb
Résistif – semi-conducteur	Résistance ; Conductance	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Miniature</li> <li>- Faible coût (&lt; 20€)</li> <li>- Faible consommation électrique</li> <li>- Facilité d'utilisation</li> <li>- Grande sensibilité</li> <li>- Temps de réponse faible</li> <li>- Large gamme de gaz détectables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible sélectivité</li> <li>- Durée de vie limitée (~2 ans)</li> <li>- Dépendance à la température</li> <li>- Problèmes de dérive</li> </ul>	10 ppb à 1 ppm
PID	Charge électrique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longue durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manque de sensibilité et de sélectivité</li> <li>- Difficulté d'utilisation</li> <li>- Dimensions</li> <li>- Gamme de gaz détectables limitée</li> <li>- coût élevé (&gt;100€)</li> </ul>	~100 ppm
Optique	Pic d'absorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longue durée de vie</li> <li>- Miniaturisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté d'utilisation</li> <li>- Coût élevé</li> <li>- Gamme de gaz détectables limitée</li> </ul>	~100 ppm
Conductimétriques	Conductivité thermique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longue durée de vie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté de miniaturisation et d'utilisation</li> <li>- Difficulté d'utilisation,</li> <li>- Non sélectivité.</li> <li>- Coût élevé (&gt;100€)</li> </ul>	

FIGURE 10.13 – Typologie des capteurs - avantages/inconvénients [68]

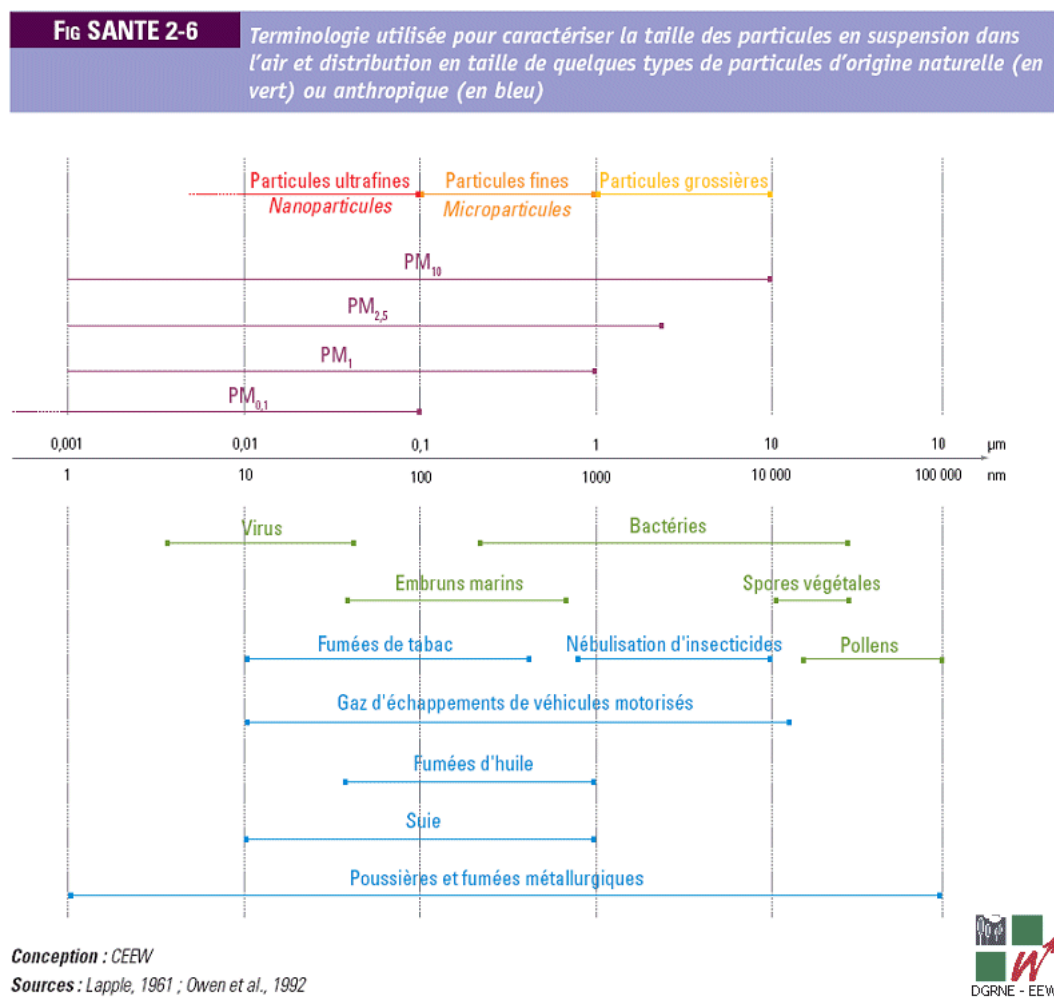


FIGURE 10.14 – Quelques exemples de type de particules de taille PM0.1 à PM10 [72]

---

## Références bibliographiques

---

- [1] Documentation de la carte ioio-otg - <https://github.com/ytai/ioio/wiki>.
- [2] <http://193.190.182.213/webairquality/accueil.aspx>.
- [3] <http://aircasting.org>.
- [4] <http://airqualityegg.com> - <http://shop.wickeddevice.com/product/air-quality-egg-v2-no2-co/>.
- [5] <http://aqicn.org/map/northamerica/>.
- [6] <http://aqicn.org/sensor/shinyei>.
- [7] [http://cyber.collegeshawinigan.qc.ca/cpedneault/documents\\_chimie\\_iv/potentiometrie\\_1.pdf](http://cyber.collegeshawinigan.qc.ca/cpedneault/documents_chimie_iv/potentiometrie_1.pdf).
- [8] [http://deus.irceline.be/~celinair/documents/smogprotocol/smog\\_protocole\\_fr.pdf](http://deus.irceline.be/~celinair/documents/smogprotocol/smog_protocole_fr.pdf).
- [9] [http://deus.irceline.be/~celinair/index/subindex\\_air.php?lan=fr](http://deus.irceline.be/~celinair/index/subindex_air.php?lan=fr).
- [10] <http://geojson.org/geojson-spec.html>.
- [11] <http://habitatmap.org>.
- [12] <http://inovafitness.com/en/laser-pm2-5-sensor-laser-dust-sensor-39.html>.
- [13] [http://iramis.cea.fr/phocea/vie\\_des\\_labos/ast/ast\\_sstechnique.php?id\\_ast=348](http://iramis.cea.fr/phocea/vie_des_labos/ast/ast_sstechnique.php?id_ast=348).
- [14] <http://jsonlint.com>.
- [15] <http://labco.koreasme.com/en/down/dust%20sensor-eng.pdf>.
- [16] <http://leafletjs.com>.
- [17] <https://allairgoo.mobi>.
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/analyse\\_gravimetrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/analyse_gravimetrique).
- [19] <https://fr.wikipedia.org/wiki/belgique>.
- [20] [https://fr.wikipedia.org/wiki/convention\\_sur\\_la\\_pollution\\_atmosphérique\\_transfrontière\\_à\\_longue\\_distance](https://fr.wikipedia.org/wiki/convention_sur_la_pollution_atmosphérique_transfrontière_à_longue_distance).
- [21] [https://fr.wikipedia.org/wiki/rapport\\_cyclique](https://fr.wikipedia.org/wiki/rapport_cyclique).
- [22] <https://fr.wikipedia.org/wiki/reflectometrie>.
- [23] [https://fr.wikipedia.org/wiki/spectrometrie\\_de\\_fluorescence\\_x](https://fr.wikipedia.org/wiki/spectrometrie_de_fluorescence_x).

- 
- [24] [https://fr.wikipedia.org/wiki/spectrométrie\\_de\\_fluorescence\\_x](https://fr.wikipedia.org/wiki/spectrométrie_de_fluorescence_x).
  - [25] [http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au\\_appl\\_e.pdf](http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y1010au_appl_e.pdf).
  - [26] <https://source.android.com/accessories/protocol.html>.
  - [27] [https://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=pm2.5\\_laser\\_dust\\_sensor\\_sku:sen0177](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=pm2.5_laser_dust_sensor_sku:sen0177).
  - [28] <https://www.vmm.be/lucht/ozon>.
  - [29] [http://takingspace.org/wp-content/uploads/shinyeippd42ns\\_deconstruction\\_tracy\\_allen.pdf](http://takingspace.org/wp-content/uploads/shinyeippd42ns_deconstruction_tracy_allen.pdf).
  - [30] [http://www.airparif.asso.fr/\\_pdf/tableau-polluants-origine-impacts.pdf](http://www.airparif.asso.fr/_pdf/tableau-polluants-origine-impacts.pdf).
  - [31] [http://www.awt.be/contenu/tel/dem/barometre\\_tic\\_2014.pdf](http://www.awt.be/contenu/tel/dem/barometre_tic_2014.pdf).
  - [32] <http://www.citoyenscapseurs.net/2014/03/31/citizenair-io/>.
  - [33] [http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product\\_id=1272&search=sen0177&description=true#.vdi5ckb6w9e](http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product_id=1272&search=sen0177&description=true#.vdi5ckb6w9e).
  - [34] <http://www.dylosproducts.com/dcproairqumo.html>.
  - [35] <http://www.eeb.org/air-o-meter/?country=29#map>.
  - [36] <http://www.emep.int>.
  - [37] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16679#c20751>.
  - [38] <http://www.febiac.be/statistiques/2015/2.e.3.a.%20chiffres-cl%e9s.xls>.
  - [39] <http://www.ge-mcs.com/download/temperature/930-164a-lr.pdf>. *General Electric Company - Measurement & Control business - Documentation 2012*.
  - [40] <http://www.gizmag.com/micropem-air-pollution-monitoring-device/22207/>.
  - [41] <http://www.gizmag.com/smartphone-app-measures-air-pollution/16433/> - viterbi & university of california 2010.
  - [42] <http://www.gizmag.com/smartphone-sensor-crowdsourced-pollution-map-karlsruhe/32932/>.
  - [43] <http://www.ibgebim.be:8080/pollumetre/graph.action?lang=fr>.
  - [44] <http://www.ibgebim.be:8080/pollumetre/graph.action?lang=fr>.
  - [45] <http://www.innocentive.com>.
  - [46] <http://www.inpes.sante.fr/cfesbases/catalogue/pdf/1187.pdf>.
  - [47] [http://www.irceline.be/œcelinair/station\\_index.html](http://www.irceline.be/œcelinair/station_index.html).
  - [48] <http://www.irceline.be/fr>.
  - [49] <http://www.irceline.be/fr/qualite-de-lair/previsions/particules-fines>.
  - [50] <http://www.issep.be/qualite-de-lair/>.

- 
- [51] [http://www.jacobsschool.ucsd.edu/news/news\\_releases/release.sfe?id=1295](http://www.jacobsschool.ucsd.edu/news/news_releases/release.sfe?id=1295) university of california 2012.
  - [52] <http://www.opticalconsulting.com/optical-consulting/capabilities.html>.
  - [53] <http://www.resultsfromcrowds.com/features/crowdsourcing-services/>.
  - [54] <http://www.sca-shinyei.com/pdf/ppd42ns.pdf>.
  - [55] [http://www.skinc.com/catalog/product\\_info.php?cpath=300000000\\_302000000\\_302400000\\_302400100\\_302400101&products\\_id=1179](http://www.skinc.com/catalog/product_info.php?cpath=300000000_302000000_302400000_302400100_302400101&products_id=1179).
  - [56] [http://www.spectralcalc.com/atmosphere\\_browser/modify\\_atmosphere.php](http://www.spectralcalc.com/atmosphere_browser/modify_atmosphere.php).
  - [57] [http://www.who.int/hia/green\\_economy/indicators\\_energy2.pdf?ua=1](http://www.who.int/hia/green_economy/indicators_energy2.pdf?ua=1).
  - [58] [http://www.who.int/hia/green\\_economy/indicators\\_energy2.pdf?ua=1](http://www.who.int/hia/green_economy/indicators_energy2.pdf?ua=1).
  - [59] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs292/fr/>.
  - [60] Illustration du concept de crowdsourcing provenant de l'article "crowdsourcing with smartphones" - introduction page 1.
  - [61] Librairie api de la carte ioio-otg - <https://github.com/ytai/ioio>.
  - [62] L'étude des conditions sous lesquelles un projet de crowdsourcing serait statistiquement significatif pour l'évaluation des performances des opérateurs de télécommunication. *Projet Personnel - Etat de l'art - BAC3 - Unamur 2014 - Promoteur : Laurent Schumacher, chargée de cours : Laurence Masclet*.
  - [63] [www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/](http://www.howmuchsnow.com/arduino/airquality/).
  - [64] [www.mturk.com/mturk/](http://www.mturk.com/mturk/).
  - [65] Anne Hyvärinen Aino Nevalainen. Health effects of indoor pollutants : Integrating microbial, toxicological and epidemiological approaches, eu seventh framework programme. Institut national de santé et de protection sociale à Kuopio, Finlande 2008-2013.
  - [66] Ariel Amato, Angel D. Sappa, Alicia Fornés, Felipe Lumbreras, and Josep Lladós. Divide and conquer : Atomizing and parallelizing a task in a mobile crowdsourcing platform. In *Proceedings of the 2Nd ACM International Workshop on Crowdsourcing for Multimedia*, CrowdMM '13, pages 21–22. ACM, 2013.
  - [67] H.R. Anderson. Air pollution and mortality : A history. *Atmospheric Environment*, 43(1) :142 – 152, 2009. Atmospheric Environment - Fifty Years of Endeavour.
  - [68] Zaher Al Barakeh. Suivi de pollution atmosphérique par système multi-capteurs - méthode mixte de classification et de détermination d'un indice de pollution. 2012emse0677 tel-00795609 provenant de <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00795609>. tel.archives-ouvertes.fr, 2012.
  - [69] S. Bauduin, A. Delville, J. Janssis, and V. Loodts. Printemps des sciences <http://inforsciences8.ulb.ac.be> videospds2010filesexposcienceschimioluminescence\_tous.pdf. ULB, 2010.



- [70] VE Bochenkov and GB Sergeev. Sensitivity, selectivity, and stability of gas-sensitive metal-oxide nanostructures. *Metal Oxide Nanostructures and Their Applications*, 3 :31–52, 2010.
- [71] Daren C. Brabham. *Crowdsourcing*. The MIT Press - Essential knowledge series, 2013 - isbn 978-0-262-51847-5.
- [72] ENVIRONNEMENT CEEW COUNCIL ON ENERGY and 1992 WATER sources initiales Lapple, 1961 et Owen et al. Quelques exemples de particules de différentes tailles - provenant du site [http://etat.environnement.wallonie.be/print.php?file=uploads/rapports/parties/chapitres/fiches/figures/figure\\_sante\\_02\\_06.gif](http://etat.environnement.wallonie.be/print.php?file=uploads/rapports/parties/chapitres/fiches/figures/figure_sante_02_06.gif). *Etat.environnement.wallonie.be*.
- [73] G. Chatzimilioudis, A. Konstantinidis, C. Laoudias, and D. Zeinalipour-Yazti. Crowdsourcing with smartphones, provenant du site <http://staff.frederick.ac.cy/com.ca/andreasconstantinides/docs/ieeeic12.pdf>, téléchargé le 24 janvier 2014. volume 16, pages 36–44. *Journal Internet Computing*, IEEE, Sept 2012.
- [74] C.Voisin, C.Chasseur, P.Gosselin, S.Fierens, and A.Van Nieuwenhuyse. Isp-wib - institut scientifique de santé publique - la pollution de l'air intérieur. 2012.
- [75] Barthélémy Daude. Développement d'un photomètre uv pour des mesures de référence de gaz d'intérêt atmosphérique : Ozone et covs. *atmospherix and oceanic physics*. université pierre et marie curie - paris vi paris vi <nnt : 2012pao66380> <tel-00828177> provenant de <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00828177/document>. *tel.archives-ouvertes.fr*, 2012.
- [76] Ross Dawson and Steve Bynghall. *Getting results from crowds*. Advanced Human Technologies, November 2011 - isbn 978-0-9847838-0-9.
- [77] Agence européenne pour l'environnement. Air pollution fact sheet 2014 provenant de <http://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-country-fact-sheets-2014/belgium-air-pollutant-emissions-country-factsheet>. *Belgian Fact Sheet*, 2014.
- [78] Jeff Howe. *The Rise of Crowdsourcing*, téléchargé en Novembre 2013 provenant du site [http://www.wired.com/wired/archive/14.06/crowds\\_pr.html](http://www.wired.com/wired/archive/14.06/crowds_pr.html). *Wired Magazine*, Juin 2006.
- [79] Jeff Howe. *Crowdsourcing - Why the power of the crowd is driving the future of business*. Three Rivers Press, 2008 - isbn 978-0-307-39621-1.
- [80] Pierre Comon Jean-Louis Lacoume, Pierre-Olivier Amblard. Statistiques d'ordres supérieurs pour le traitement du signal s.n. s.l. provenant du site <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/16/94/60/pdf/livre10.pdf>, téléchargé en février 2014, pages 66–67 section 2.5.1. Avril 1999.
- [81] Mokhloss Khadem, Grigore Stamatescu, and Valentin Sgarciu. Wireless measurement node for dust sensor integration. In *Conference SENSORCOMM 1012*, pages 159–164. ACM, 19/08/2012.

- 
- [82] Prashant Kumar, Lidia Morawska, Claudio Martani, George Biskos, Marina Neophytou, Silvana Di Sabatino, Margaret Bell, Leslie Norford, and Rex Britter. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75(0) :199 – 205, 2015.
  - [83] Sushmit Mallik. Thesis - a small airborne particulate matter sensor using a parabolic mirror - north carolina state university provenant de [http ://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/9900/1/etd.pdf](http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/9900/1/etd.pdf). 2014.
  - [84] P.S. Monks, C. Granier, S. Fuzzi, A. Stohl, M.L. Williams, H. Akimoto, M. Amann, A. Baklanov, U. Baltensperger, I. Bey, N. Blake, R.S. Blake, K. Carslaw, O.R. Cooper, F. Dentener, D. Fowler, E. Fragkou, G.J. Frost, S. Generoso, P. Ginoux, V. Grewe, A. Guenther, H.C. Hansson, S. Henne, J. Hjorth, A. Hofzumahaus, H. Huntrieser, I.S.A. Isaksen, M.E. Jenkin, J. Kaiser, M. Kanakidou, Z. Klimont, M. Kulmala, P. Laj, M.G. Lawrence, J.D. Lee, C. Liousse, M. Maione, G. McFiggans, A. Metzger, A. Mieville, N. Moussiopoulos, J.J. Orlando, C.D. O'Dowd, P.I. Palmer, D.D. Parrish, A. Petzold, U. Platt, U. Pöschl, A.S.H. Prévôt, C.E. Reeves, S. Riemann, Y. Rudich, K. Sellegri, R. Steinbrecher, D. Simpson, H. ten Brink, J. Theloke, G.R. van der Werf, R. Vautard, V. Vestreng, Ch. Vlachokostas, and R. von Glasow. Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, 43(33) :5268 – 5350, 2009. {ACCENT} Synthesis.
  - [85] OCDE. Perspectives de l'environnement de l'ocde à l'horizon 2050 chapitre 6. 2012.
  - [86] OCDE. Le coût de la pollution de l'air. 2014.
  - [87] Jason Seitz and Chenan Tong. Lmp91051 ndir co2 gas detection system. *Application Report SNAA207*, Mai 2013.
  - [88] Paul Sloane. *A guide to open innovation and crowdsourcing*. Kogan Page Limited, 2011 - isbn 978-0-7494-6307-6.
  - [89] Matthias Stevens and Ellie D'Hondt. Crowdsourcing of pollution data using smartphones provenant de [soft.vub.ac.be/publications/2010/vub-tr-soft-10-15.pdf](http://soft.vub.ac.be/publications/2010/vub-tr-soft-10-15.pdf). *Journal UbiComp*, Septembre 2010.
  - [90] James Surowiecki. *The Wisdom of Crowds*. Anchor Books, August 2004 - isbn 0-385-72170-6.
  - [91] D. Tathagata, R. Ramachandran, M. Prashanth, S. Asankhaya, and Venkata N. Padmanabhan. Prism : Platform for remote sensing using smartphones, provenant du site [http ://research.microsoft.com/pubs/131575/mobi096-das.pdf](http://research.microsoft.com/pubs/131575/mobi096-das.pdf). [http ://www.sigmobility.org/mobisys/2010/](http://www.sigmobility.org/mobisys/2010/), 15-18 Juin 2010.
  - [92] Paul A. Webb. A primer on particle sizing by static laser light scattering - provenant du site [http ://www.particletesting.com/repository/files/a\\_primer\\_on\\_particle\\_sizing\\_by\\_static\\_laser\\_light\\_scattering.pdf](http://www.particletesting.com/repository/files/a_primer_on_particle_sizing_by_static_laser_light_scattering.pdf). *Micromeritics Instrument Corp. Technical Workshop Series : Introduction to the Latest ANSI/ISO Standard for Laser Particle Size Analysis*, Janvier 2000.

---

## Table des figures

---

2.1	Concept du crowdsourcing [60]. . . . .	13
2.2	Simulations des déplacements de 329 personnes sur un km <sup>2</sup> . . . . .	17
2.3	Illustration du concept KIT [42]. . . . .	20
2.4	Interface utilisateur de Visibility [41]. . . . .	21
3.1	Les constituants gazeux de l'atmosphère de 0 à 100 m d'altitude [56]. . . .	22
5.1	Récapitulatif des méthodes d'analyse d'espèce gazeuse [68]. . . . .	48
6.1	Fonctionnement général d'un capteur de gaz [68]. . . . .	53
6.2	Illustration des bandes d'énergie entre métal, semi-conducteur et isolant [68].	55
6.3	Enveloppe des temps de réponse d'un semi-conducteur [68]. . . . .	56
6.4	Principe de détection NDIR [87]. . . . .	57
6.5	Principe de détection LPO [6]. . . . .	59
6.6	Illustrations du principe de diffusion d'un rayon lumineux [92]. . . . .	60
6.7	Modification optique des angles d'incidences des rayons lumineux pour la cellule de détection [92]. . . . .	61
7.1	Platine d'interface analogique digital - IOIO OTG [1]. . . . .	64
7.2	Personal Environmental Monitor [55]. . . . .	66
7.3	Sharp GP2Y1010AU0F [25] et ses faisceaux lumineux internes [52]. . . . .	67
7.4	Correspondance voltage-concentration du capteur Sharp [25]. . . . .	67
7.5	Schéma de connection du capteur Sharp [25]. . . . .	68
7.6	PWM du capteur Sharp [25]. . . . .	68
7.7	Shinyei PPD42NS et une représentation de la zone de détection [29]. . . . .	69
7.8	Correspondance ratio-concentration du capteur Shinyei [54]. . . . .	70
7.9	Capteur DFRobot SEN0177 et son module de communication uart [27]. . . .	71
7.10	Structure interne du capteur DFRobot SEN0177 [27]. . . . .	72
7.11	Diagramme des composants de l'architecture. . . . .	73
7.12	Vue oscilloscope du signal PWM généré. . . . .	77
7.13	Platine d'expérimentation arduino avec les modules Sharp et Shinyei. . . .	78
7.14	Diagramme des connexions Sharp - Shinyei - Arduino. . . . .	79

---

7.15 Smartphone Samsung Galaxy S3 et module usb du prototype SEN0177, vue intérieure et extérieure. . . . .	83
7.16 Intégration mesure PM au sein de PrismOnBike. . . . .	84
7.17 Interface utilisateur de PrismOnLine Viewer. . . . .	87
8.1 Les données provenant de la station de Vezin 43N073 [49]. . . . .	88
8.2 Collection de données provenant des capteurs "low-cost". . . . .	89
8.3 Superposition aux données de la station de Vezin. . . . .	90
8.4 Quelques mesures comparatives supplémentaires en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . . . . .	91
10.1 Schéma récapitulatif des Business-Model du Crowdsourcing Provenant du site compagnon du livre "Getting Results from crowds" [76] . . . . .	107
10.2 Décès prématurés dans le monde liés aux risques environnementaux Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	108
10.3 Emissions de $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_x$ , CN Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	108
10.4 Concentrations de PM10 de quelques pays Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	109
10.5 Concentrations d'ozone troposphérique de quelques pays Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	109
10.6 Décès prématurés dans le monde imputables à l'exposition aux particules Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	110
10.7 Décès prématurés dans le monde imputables à l'exposition à l'ozone troposphérique Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	110
10.8 Population urbaine et concentrations moyennes annuelles de PM10 Scénario de référence 2010-2050 OCDE [85] . . . . .	111
10.9 Directives européennes pour la protection et réglementation de la qualité de l'air . . . . .	111
10.10 Indice ATMO pour la qualité de l'air en France . . . . .	112
10.11 Indice BELATMO pour la qualité de l'air en Belgique . . . . .	112
10.12 Récapitulatif des objectifs de qualité de l'air et limites imposées par la directive européenne 2008/50/CE [68] . . . . .	113
10.13 Typologie des capteurs - avantages/inconvénients [68] . . . . .	114
10.14 Quelques exemples de type de particules de taille PM0.1 à PM10 [72] . . . . .	115